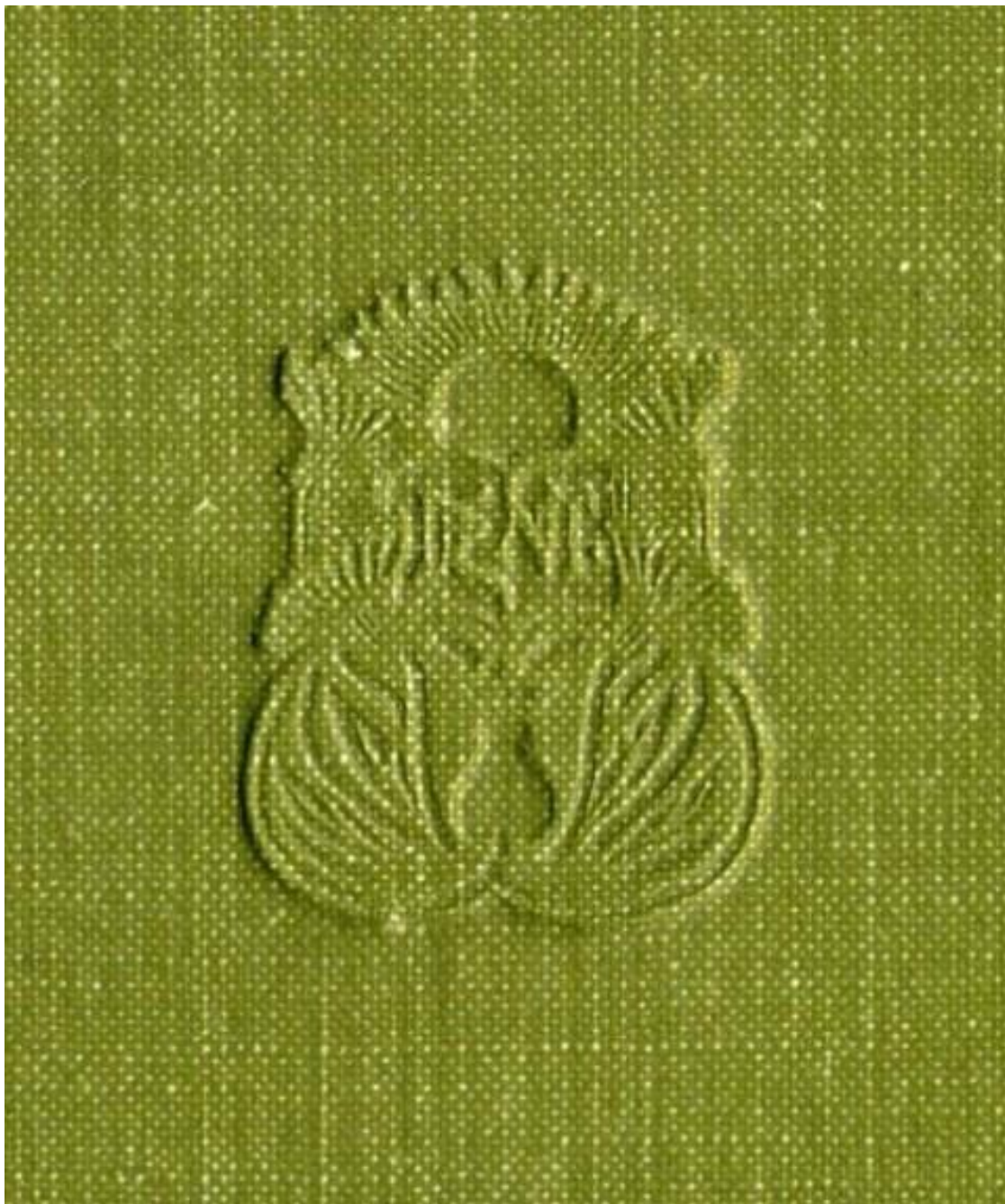


Лорд Кельвин: Отчет о его научной жизни и работе

Эндрю Грей



Электронная книга проекта "Гутенберг" Лорда Кельвина: отчет о его научной жизни и работе

Эта электронная книга предназначена для использования любым человеком в любой точке Соединенных Штатов и большинства других частей мира бесплатно и практически без каких-либо ограничений. Вы можете скопировать его, раздать или повторно использовать в соответствии с условиями лицензии Project Gutenberg, прилагаемой к этой книге, или онлайн по адресу www.gutenberg.org. Если вы находитесь за пределами Соединенных Штатов, вам необходимо ознакомиться с законами страны, в которой вы находитесь, прежде чем использовать эту электронную книгу.

Название: Лорд Кельвин: Отчет о его научной жизни и творчестве

Автор: Эндрю Грей

Дата выхода: 4 апреля 2012 [Электронная книга №39373]

Язык: Английский

В титрах: Продюсерами выступили Лора Уайзвелл, Тургут Динсер, Тамиз Тоттерделл и команда онлайн-корректоров на <http://www.pgdp.net> (Оригинальный экземпляр этой книги был любезно предоставлен для сканирования математическим факультетом Университета Глазго.)

*** НАЧАЛО ПРОЕКТА ЭЛЕКТРОННОЙ КНИГИ ГУТЕНБЕРГА "ЛОРД КЕЛЬВИН: ОТЧЕТ О ЕГО НАУЧНОЙ ЖИЗНИ И ТВОРЧЕСТВЕ" ***

АНГЛИЙСКИЕ УЧЕНЫЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Дж. РЕЙНОЛЬДСА ГРИНА, доктора технических наук

ЛОРД КЕЛЬВИН

АНГЛИЙСКИЕ УЧЕНЫЕ

Под редакцией доктора Дж. РЕЙНОЛЬДСА ГРИНА.

*С фотогравюрным фронтисписом.
Малый Кр. 8во, 2с. 6д. нетто за объем.*

СПЕНСЕР. Дж. Артур Томпсон.

ПРИСТЛИ. Автор: доктор Торп, С.В., F.R.S.

ЦВЕТOK. Автор: профессор Р. Лайдеккер, F.R.S.

ХАКСЛИ. Автор: профессор. Эйнсворт Дэвис.

БЕНТАМ. Б. Дейдон Джексон, Ф.Л.С.

ДАЛТОН. Дж. П. Миллингтон, магистр медицины

J. M. DENT & CO.



Kelvin

LORD KELVIN

*AN ACCOUNT OF HIS SCIENTIFIC
LIFE AND WORK*

BY

ANDREW GRAY

LL.D., F.R.S., V.-P.R.S.E.

PROFESSOR OF NATURAL PHILOSOPHY IN THE
UNIVERSITY OF GLASGOW



PUBLISHED IN LONDON BY
J. M. DENT & CO., AND IN NEW
YORK BY **E. P. DUTTON & CO.**

1908

ЛОРД КЕЛЬВИН

ОТЧЕТ О ЕГО НАУЧНОЙ ЖИЗНИ И РАБОТЕ

АВТОР ЭНДРЮ ГРЕЙ

Доктор права, Ф.Р.С., V.-P.R.S.E.

ПРОФЕССОР ЕСТЕСТВЕННОЙ ФИЛОСОФИИ В УНИВЕРСИТЕТЕ ГЛАЗГО



ОПУБЛИКОВАНО В ЛОНДОНЕ ИЗДАТЕЛЬСТВОМ
J. M. DENT & CO. И В НЬЮ-
Йорке ИЗДАТЕЛЬСТВОМ E. P. DUTTON & CO.

1908

Richard Clay & Sons, Limited,
БРЕД-СТРИТ-ХИЛЛ, округ КОЛУМБИЯ, И БАНГЕЙ, САФФОЛК.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга не претендует на то, чтобы быть биографией лорда Кельвина в обычном смысле этого слова. Это продолжение статьи, которая появилась в *Glasgow Herald* за 19 декабря 1907 года и была написана по предложению различных друзей лорда Кельвина из Университета Глазго и других мест, которые прочитали эту статью. Цель этой книги - дать отчет о научной деятельности лорда Кельвина и объяснить студентам и широкому кругу читателей, которые проявляют

интерес к физической науке и ее приложениям, природу его открытий. Предпринимается попытка только такого изложения биографических фактов, которое, по-видимому, согласуется с этой целью. Но я рискнул, как старый ученик и ассистент лорда Кельвина, зарисовать здесь и там обстановку в его классной комнате и лаборатории и записать некоторые эпизоды его преподавания и работы.

Я в долгу перед владельцами *Glasgow Herald* за их добровольно предоставленное разрешение на использование их статьи, а также перед господами Дж. Аннан, фотографы из Глазго и господина Дж. Издательству "Джеймс Маклехоз и сыновья", Глазго, за иллюстрации, которые, я надеюсь, повысят интерес к книге.

А. Грей.

Университет, Глазго, 20
мая 1908 года.

Содержание

ГЛАВА	СТРАНИЦА
I. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И РАННЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ	1
II. ЗАНЯТИЯ В УНИВЕРСИТЕТЕ ГЛАЗГО. ПЕРВЫЕ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ	13
III. КЕМБРИДЖСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ. НАУЧНАЯ РАБОТА В КАЧЕСТВЕ бакалавра	23
IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В РАВНОВЕСИИ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНВЕРСИЯ	33
Против КАФЕДРЫ ЕСТЕСТВЕННОЙ ФИЛОСОФИИ В ГЛАЗГО. ОСНОВАНИЕ ПЕРВОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ	61
VI. ДРУЖБА Со СТОКСОМ И ДЖОУЛЕМ. РАННЯЯ РАБОТА В ГЛАЗГО	79
VII. "ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ТЕПЛА КАРНО" —ПЕРЕХОД К ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТЕПЛА	99
VIII. ТЕРМОДИНАМИКА И АБСОЛЮТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ	114
IX. ГИДРОДИНАМИКА—ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРЕМА О МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ	153
X. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА—ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ—ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ	176
XI. "НАТУРФИЛОСОФИЯ" ТОМСОНА И ТЕЙТА—ГИРОСТАТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ—"ЭЛЕКТРОСТАТИКА И МАГНЕТИЗМ"	194
XII. ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ	229
XIII. КОМИТЕТ БРИТАНСКОЙ АССОЦИАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ СТАНДАРТАМ	244

XIV.	ЛЕКЦИИ В БАЛТИМОРЕ	254
XV.	СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ТЕЛЕГРАФНЫХ СИГНАЛОВ—ПРОКЛАДКА ПОДВОДНЫХ КАБЕЛЕЙ—ТЕЛЕГРАФНЫЕ ПРИБОРЫ—НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ, КОМПАС И ЗОНДИРУЮЩАЯ МАШИНА	264
XVI.	ЛОРД КЕЛЬВИН В СВОЕМ КЛАССЕ И ЛАБОРАТОРИИ	279
XVII.	ПРАКТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ—ПОЧЕСТИ И ОТЛИЧИЯ—ПОСЛЕДНЯЯ БОЛЕЗнь И СМЕРТЬ	299
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	305
	ИНДЕКС	317

ИСПРАВЛЕНИЕ

Страница 105, строка 9 снизу, вместо де+О читать де+ о

СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

	Лицом к
странице с лордом Кельвином (фотогравюра)	фронтиспис
Лорда Кельвина в 1846 году	64
Вид на Олд-колледж	70

ЛОРД КЕЛЬВИН

ГЛАВА I

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И РАННЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Лорд Кельвин происходил из рода, который помог обеспечить северной Ирландии ее торговое и промышленное превосходство над остальной частью этой многострадальной страны. Его предки были земледельцами графства Даун шотландского происхождения. Его отцом был Джеймс Томсон, хорошо известный профессор математики из Глазго и автор математических учебников, которые в свое время высоко ценились и даже сейчас заслуживают консультации. Джеймс Томсон родился 13 ноября 1786 года недалеко от Баллинахинча, графство Даун. Будучи сыном мелкого фермера, он, вероятно, не смог поступить в университет в обычном возрасте, поскольку поступил в Шотландию только в 1810 году. Списки учеников того времени показывают, что он высоко отличился в математике, натурфилософии и классике.

Интересный случай из студенческих лет его отца был описан лордом Кельвином в его вступительном слове на пост ректора университета в 1904 году и заслуживает внимания, поскольку указывает на то, насколько сравнительно недавними стали многие характеристики нашей современной жизни и коммерции. Джеймс Томсон и несколько его товарищей, шедшие пешком из Гринока в Глазго, чтобы присоединиться к занятиям в колледже в начале сессии, "увидели чудо — черную трубу, быстро двигавшуюся за полем по левую сторону их дороги. Они перепрыгнули через забор, побежали через поле и, к своему изумлению, увидели "Комету" Генри Белла (которой тогда не было и года), плывущую по реке Клайд между Глазго и Гриноком".¹ Иногда переход из Белфаста в Гринок занимал много времени. Однажды Джеймс Томсон, переправляясь на старом лайнере, перевозившем известь, находился в пути три или четыре дня, в течение которых судно, вошедшее в штиль, трижды огибало приливом Эйлса-Крейг.

Мистер Томсон был избран в 1815 году профессором математики в Королевском академическом институте Белфаста и занимал этот пост семнадцать лет, создав себе отличную репутацию как преподаватель и как ясный и точный писатель. Как раз тогда аналитические методы начали вытеснять процессы геометрической демонстрации, которые форма, принятая Ньютоном для *Principia*, имела тенденцию увековечиваться в этой стране. Лаплас был на пике своей славы во Франции и писал великие аналитические *принципы*, свою *механику Селеста*, применяя всю силу своего гения и все ресурсы дифференциального и интегрального исчисления, изобретенного Ньютоном и усовершенствованного математиками прошедшего столетия, для выяснения и расширения "системы мира", которая была так смело набросана основателем современной физической науки.

В тот период Фурье написал свои мемуары о теплопроводности и подарил миру свою бессмертную книгу, которая послужит источником вдохновения для философов-физиков последующих поколений. Лежандр написал мемуары, которые в руках Якоби и его преемников должны были привести к новой области математики, в то время как в Германии Гаусс начал свое величественное шествие открытий.

Методы и результаты этого периода математической деятельности поначалу были малоизвестны в нашей стране: рабская преданность Кембриджа геометрическим процессам и плавной системе счисления Ньютона, исключительное пристрастие, которое сам Ньютон осудил бы первым, привели к тому, что аналитические методы, в равной степени ньютоновские, были заклеены как инновации, поскольку были облачены в непривычные одежды континентальной системы счисления. Восстание против этого возглавили сэр Джон Гершель, Вудхауз, Пикок и некоторые другие из Кембриджа, написавшие книги, оказавшие большое влияние на изменение методов. Сэр Джон так описал эффект новых движений: "Студенты наших университетов, не скованные никакими предрассудками, не опутанные никакими привычками и воодушевленные пылом и соперничеством молодежи, слышали о существовании массы знаний, доступа к которым они были лишены по простой случайности положения. Большого им и не требовалось. Престиж, преувеличивающий неизвестное, и привлекательность, присущая запретному, совпали в их порыве. Книги были приобретены, прочитаны и произвели свой естественный эффект. Брови многих кембриджских экзаменаторов приподнялись, наполовину от гнева, наполовину от восхищения, при виде необычных ответов, которые начали появляться в

экзаменационных работах. Даже модераторы сделаны не из непробиваемого материала, хотя и ограждены семикратным Жаккардом и жесткой бычьей шкурой Винса и Вуда".

Мемуары и трактаты континентальных аналитиков были охотно приобретены и изучены Джеймсом Томсоном, и поскольку он не был связан никакими экзаменационными традициями, он свободно перенял их методы, поскольку они входили в сферу его преподавания, и ознакомил с ними английскую читающую публику в своих учебниках. Следовательно, когда кафедра математики в Глазго освободилась в 1832 году из-за смерти мистера Джеймса Миллара, мистер Томсон был сразу же выбран факультетом, который в то время был выборным органом.

Факультет состоял из директора и профессоров богословия, церковной истории, восточных языков, натурфилософии, моральной философии, математики, логики, греческого языка, гуманизма, гражданского права, медицинской практики, анатомии и Практической астрономии. Он управлял всеми доходами и имуществом колледжа и пользовался покровительством вышеназванных кафедр, за исключением церковной истории, гражданского права, медицины, анатомии и астрономии, так что мистер Томсон стал не только профессором математики, но и, в силу занимаемой должности, членом того, что на самом деле было высшим руководящим органом Университета. Членам профессорско-преподавательского состава, за исключением профессора астрономии, который проживал в обсерватории, были предоставлены официальные резиденции в колледже. Этот порядок соблюдается до сих пор; хотя теперь правительство находится в руках Университетского суда, а Сенат (который раньше собирался только для присуждения ученых степеней или для управления библиотекой и некоторых других вопросов) регулирует преподавание и дисциплину и наблюдает за ними.

Профессор Томсон ни в коем случае не был первым или единственным профессором с таким именем в Университете Глазго, о чем забавно свидетельствует следующий отрывок, процитированный из письма Джона Никола, сына доктора Дж. П. Никола и первого профессора английского языка в Глазго:

Нибур, изучив часть *Fasti Consulares*, пришел к выводу, что *римский народный сенат* заключил соглашение ежегодно избирать члена дома Фабиев на один из высших государственных постов, настолько густо записи испещрены именем Фабиев. Какой-нибудь будущий Нибур из новозеландской газеты, как воображает Маколей, обратив свое внимание на анналы колледжа Глазго, несомненно, придет к выводу, что лидеры этой прославленной корпорации в период, о котором я пишу, были связаны подобным образом с именем Томсона. Представители этого великого рода занимали половину кафедр в Университете. Я не рискну сказать, скольких из них я знал. Там были химик Томми Томсон; Уильям Томсон из *Materia Medica*; Аллен Томсон из анатомии, брат последнего; доктор Джеймс Томсон из математики; Уильям, его сын, и т.д., и т.п. Старый доктор Джеймс был одним из лучших ирландцев, хорошим математиком, увлеченным и преуспевающим учителем, автором нескольких ценных школьных учебников, другом моего отца и сам был отцом большого семейства, члены которого преуспевали во всем мире. Они жили рядом с нами во дворе, и мы со всеми ними довольно близко познакомились".

Бывший профессор естественной философии, доктор Андерсон², который, по-видимому, прожил последние годы своей жизни в почти постоянной войне со своими коллегами по факультету и который организовал классы естественных наук для рабочих в Глазго, завещал некоторую сумму денег на открытие колледжа в Глазго, в котором могли бы проводиться такие занятия. Результатом стало основание того, что раньше называлось "Андерсоновским

университетом" на Джордж-стрит, предшественника великолепного технического колледжа наших дней. Это название и большое количество Томсонов, которые были и до сих пор связаны с Университетом Глазго, привели к тому, что более древнее учебное заведение нередко называли "Томсоновским университетом"!

Томас Томсон (не родственник Белфастских Томсонов), о котором с любовью, хотя и немного непочтительно, упоминается в приведенной выше цитате, был тогда профессором химии. Он был первым, кто основал химическую лабораторию для студентов в этой стране; действительно, его лаборатория на несколько лет опередила лабораторию Либиха в Гиссене, и вполне вероятно, что в том, что касается экспериментальной химии, Глазго тогда был впереди остального мира. Его ученику и давнему поклоннику было суждено основать первую физическую лабораторию для тех студентов, которые были готовы потратить некоторое время на экспериментальное исследование и проверку физических принципов или помочь профессору в его исследованиях. Систематическое обучение студентов методам экспериментирования посредством практических упражнений с аппаратурой было гораздо более поздней идеей, и этот факт следует принимать во внимание, когда лаборатории настоящего времени сравниваются с гораздо более скудным оснащением тех ранних дней. Лаборатория теперь в такой же степени, как и лекционный зал, является местом, где проводятся занятия и преподаются экспериментальные науки толпам студентов, и это перемена к лучшему.

Прибытие Джеймса Томсона и его семьи в колледж Глазго в 1832 году было отмечено в то время как событие, которое принесло значительное подкрепление роду, уже неразрывно связанному с этим местом: насколько велики были его последствия не только для Университета, но и для мира в целом, никто тогда и представить себе не мог. Его семья состояла из четырех сыновей и двух дочерей: его жена Маргарет Гарднер, дочь Уильяма Гарднера, торговца из Глазго, незадолго до этого умерла, и заботу о семье взяла на себя ее сестра, миссис Галл. Старшему сыну, Джеймсу Томсону, который долгое время спустя стал преемником Рэнкина на кафедре инженерии, было десять лет, и уже тогда он был заядлым изобретателем; Уильяму, будущему лорду Кельвину (родился 26 июня 1824 года), было восемь лет. Двумя младшими сыновьями были Джон (родился в 1826 году), который добился отличия в медицине, стал ассистентом-ординатором в Королевском лазарете Глазго и умер там от лихорадки, подхваченной при исполнении служебных обязанностей, и Роберт, который родился в 1829 году и умер в Австралии в 1905 году. Помимо этих четырех сыновей, у всех были три дочери: Элизабет, впоследствии жена преподобного Дэвида Кинга, доктора медицинских наук; Анна, которая была замужем за мистером Уильямом Боттомли из Белфаста (эти двое были старшими в семье), и Маргарет, младшая, которая умерла в детстве. Так началось пребывание Уильяма Томсона в Университете Глазго и его связь с ним, прервавшаяся только после церемонии похорон в Вестминстерском аббатстве 23 декабря 1907 года.

Сам профессор Томсон тщательно следил за образованием своих сыновей, которое осуществлялось дома. Они были хорошо знакомы со старыми классическими языками и, более того, получили основательное обучение тому, что даже сейчас называют, но в несколько пренебрежительном смысле, современными предметами. Как писал Джон Никол в своих письмах, "Он был строгим сторонником дисциплины и не ослаблял ее, когда применял к своим детям, и все же целью его жизни было их развитие".

Из воспоминаний Джона Никола следует, что даже в детстве и юности молодой Джеймс Томсон был увлеченным экспериментатором и изобретателем, стремившимся описать свои идеи и показать свои модели сочувствующему слушателю.³ И тогда, и в последующие годы его очаровательная простота, его всепоглощающая страсть к точности словесного выражения во всех его научных работах и преподавании, и его неподдельный и бессознательный гений изобретения механических устройств, все это основано на истинных и интуитивно воспринимаемых физических принципах, показали, что если бы у него была неумолимая способность игнорировать аксессуары и несущественные детали, которой обладал его младший брат, он мог бы достичь гораздо большего. больше, чем он сделал, каким бы значительным это ни было. Но Уильям принимал более быстрые решения, и, хотя он был осторожен и точен в выражении своего смысла, на него меньше влияли соображения об ошибках, которые могли возникнуть из-за различных коннотаций таких научных терминов, которые также являются общеупотребительными словами; и он быстро завершил работу, над которой его брат размышлял бы долгое время и, возможно, никогда не закончил.

Незнакомцу в Глазго или даже жителю Глазго в наши дни быстрого и частого общения с Англией и, если уж на то пошло, со всеми частями света трудно составить истинное представление о жизни и работе в Университете Глазго семьдесят лет назад. В то время университет располагался в старом "колледже Тунис" на Хай-стрит, где многие могли бы пожелать, чтобы он остался, и, расширяя свои здания на Колледж-Грин, сохранить старое и включить новое. Его прекрасные старые ворота и часть одного из дворов все еще были причудливым украшением несколько убогой улицы в 1871 году, после того как Университет переехал на свое нынешнее место на продуваемой всеми ветрами вершине Гилморхилла. Какими бы заброшенными они ни были, его старые стены рассказывали кое-что об истории прошлого и напоминали прохожему, что ученость процветала среди лавок горожан, и что студенты и профессора жили и работали здесь в непосредственной близости от челнока и кузницы. Старые ассоциации города, улицы или здания, часто связанные с историей нации, являются ценным достоянием, которое не всегда принимается во внимание при обсуждении преимуществ или недостатков предлагаемых изменений; но университет, который в течение четырехсот лет наблюдал за течением человеческой жизни в большом городе, полон воспоминаний, которые даже снос его стен может разрушить лишь частично. Поэты и государственные деятели, люди мысли и действия, лорды и простолюдины, сыновья богачей и дети фермеров, ремесленники и чернорабочие смешивались в его классах и сидели вместе на его скамьях; и так возникла общность мыслей и чувств, которую практика наших современных и богатых космополитов, притворяющихся, что презируют национальность, определенно не способствует. В восемнадцатом веке тогдашние хозяева и бейли все еще жили среди мужчин и женщин на Хай-стрит и ее продолжении - Солтмаркете, или неподалеку на Вирджиния-стрит, в доме табачных лордов и вест-индских купцов. Их домашнее гостеприимство, их осторожная и в то же время великолепная щедрость, их расчетливая отвага и их верная и искренняя дружба запечатлены на страницах "Скотта"; и хотя спорт и мода постепенно изменили людей и манеры, не совсем к лучшему, эти специфически шотландские добродетели все еще можно найти в гражданских государственных деятелях и крупных купцах современного Глазго. Семьдесят лет назад началось великое переселение состоятельных людей на запад, но оно почти не повлияло на жизнь Хай-стрит или Колледжа. Сейчас многие старые трущобы, кроме Веннела и Гаванны, исчезли, к чести Корпорации Глазго; и, увы, то же самое произошло со всеми остатками Старого колледжа, к большому сожалению всех, кто помнит его причудливые старые дворы. Следует предположить,

что железнодорожная компания не осмеливается обладать артистической душой, которую необходимо спасти; и поэтому, возможно, она строит огромные и уродливые караван-сарай, об исчезновении которых никто, за исключением, возможно, акционеров, не сильно сожалел бы. Но и художники, и антиквары благословили бы директоров — и такое благословение не причинило бы им вреда, — если бы они были достаточно изобретательны и набожны, чтобы оставить какую-нибудь реликвию от старых зданий в память о былых днях и былой жизни на Хай-стрит.

Фотография колледжа на Хай-стрит была недавно нарисована одним из тех, кто жил и работал в нем, хотя примерно через тридцать лет после того, как Джеймс Томсон перевез свою семью жить во дворах. Профессор Г. Г. Рамзи таким образом изобразил некоторые особенности этого места, которые могут заинтересовать тех, кто хотел бы представить среду, в которой лорд Кельвин рос с детства, пока в семнадцатилетнем возрасте не уехал из Глазго в Кембридж.⁴ "В самой неприглядности старого места было что-то такое, что создавало дружеские узы среди тех, кто там жил и работал, и это заставляет всех старых студентов по сей день оглядываться на него со своего рода семейной гордостью и благоговением. Грязные, темные, с низкими крышами номера; узкий, живописной суды, в которой кипит студенческая жизнь; мрачные, туманные утра и вечный газ; внезапный переход от драки, торгашескую Хай-Стрит в академический покой, или все-таки больше академический галдеж, из тех причудливых монастыри, в которых полицейский, так занят был не разрешено проникать; звон дерзновенным колокольчик', которые сделали студенты поспеши к двери, которая была закрыта в тот момент, когда он остановился; грохот и вспышки на субботу, с криками о кутеже или начинающейся убийство, которое будет расти в нашем тихом номера из Vennel или Хаванна; измученный усталости в воскресенье утром, когда бедные спустя рукава существ может рассматриваться, как только на улице стоял ясный прихожан, пробирается в аптеку за дозой опия, чтобы облегчить подачу разврату вчера; разговоры, которые можно было бы после завтрака со старушками на другой стороне Vennel, не в двадцати футах от стола, который разделили день между курением короткие Катти труб и пить ядовитый черный чай—эти резкие контрасты связаны колледж народных и студентов, заставляя их чувствовать себя одновременно частью настоящей населения города, а также огорожено забором из него отдельные занятия и интересы".

В 1871 году университет переехал в более просторные здания в западной части города. За прошедшие тридцать восемь лет вокруг них выросли новые здания для большинства крупных научных отделений, включая отдельный Институт естественной философии, который был открыт в апреле 1907 года принцем и принцессой Уэльскими.

ГЛАВА II

ЗАНЯТИЯ В УНИВЕРСИТЕТЕ ГЛАЗГО. ПЕРВЫЕ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

В 1834 году, то есть в возрасте десяти лет, Уильям Томсон поступил в университетские классы. Несмотря на небольшой рост и молодость даже для того времени, когда простые мальчишки были студентами университета, он вскоре обратил на себя внимание своей готовностью отвечать на вопросы и общими знаниями, особенно в математических и физических науках. В то время

классы встречались дважды в день — по математике, один раз для лекции и один раз для устного экзамена и проработки невиданных примеров учениками класса. До сих пор считается традицией, что на занятиях своего отца Уильям выделялся блеском работы, проделанной им за этот второй час. Его старший брат Джеймс и он, похоже, вместе прошли университетский курс. В 1834-5 годах они были заключены в квадратные скобки третьими по сочинению латинской прозы. В 1835-6 годах Уильям получил приз за упражнение на каникулах — перевод *"Диалогов богов" Люциана* "с полным разбором первых трех диалогов". В 1836-7 и 1837-8 годах братья учились в младшем и старшем математических классах, и каждый год первое и второе места в призовом списке достались Уильяму и Джеймсу соответственно. Во второй из этих лет Уильям занял второе место в Классе логики, в то время как Джеймс был третьим, а Джон Кэрд (впоследствии директор университета) был пятым. Уильям и Джеймс Томсон получили первую и вторую премии на уроке естественной философии в конце сессии 1838-9; и в том же году Уильям получил Классную премию по астрономии и Университетскую медаль за эссе о фигуре Земли. В 1840-1 он появляется еще раз, на этот раз в качестве пятого призера в Старшем классе гуманности.

В своей инаугурационной речи в качестве ректора университета, уже цитированной выше, лорд Кельвин обращается к своим преподавателям в колледже Глазго следующими словами:

"По сей день я вспоминаю лекции Уильяма Рамзи о римских древностях и чтения Ювенала и Плавта как более интересные, чем многие хорошие пьесы, которые я видел в театре

"Греческий язык под руководством сэра Дэниела Сэндфорда и Лашингтона, логика под руководством Роберта Бьюкенена, моральная философия под руководством Уильяма Флеминга, натурфилософия и астрономия под руководством Джона Прингла Никола, химия под руководством Томаса Томсона, очень продвинутого преподавателя и исследователя, естественная история под руководством Уильяма Каупера - все это, как я могу засвидетельствовать по своему опыту, стало интересным и ценным для студентов Университета Глазго в тридцатых и сороковых годах девятнадцатого века....

"Мой предшественник на кафедре натурфилософии, доктор Мейклхэм, прививал своим студентам почтение к великим французским математикам Лежандру, Лагранжу и Лапласу. Его непосредственный преемник в преподавании курса естественной философии,⁵ Доктор Николь, добавил Френеля и Фурье к этому списку ученых аристократов: и своим собственным вдохновляющим энтузиазмом по отношению к великой французской школе математической физики, постоянно проявляющимся в его экспериментальном и теоретическом преподавании волновой теории света и практической астрономии, он в значительной степени способствовал научному изучению и глубокому пониманию этого феномена. наука в Университете Глазго....

"Еще в 1818-1830 годах Томас Томсон, первый профессор химии в Университете Глазго, начал систематическое преподавание практической химии студентам и при содействии факультета колледжа Глазго, предоставившего участок и деньги на строительство, построил хорошо оборудованную лабораторию, которая, как я полагаю, на несколько лет опередила знаменитую лабораторию Либиха в Гиссене и была, как я полагаю, первой из всех созданных в мире лабораторий для химических исследований и практического обучения студентов университета химии. Это было в то время, когда недостаточно информированная публика привыкла считать Университет Глазго застойным пережитком средневековья и называла его профессоров "монахами Молендинара"!

"Университет Адама Смита, Джеймса Уатта и Томаса Риды никогда не был застойным. На протяжении двух с половиной столетий он был очень прогрессивным. Почти два столетия назад здесь была лаборатория анатомии человека. Семьдесят пять лет назад здесь была первая лаборатория студентов-химиков. Шестьдесят пять лет назад здесь был первый инженерный профессор Британской империи. Пятьдесят лет назад здесь была первая лаборатория для студентов—физиков - заброшенный винный погреб старого профессорского дома, несколько лет спустя расширенный за счет пристройки заброшенного экзаменационного кабинета. Тридцать четыре года назад, когда он переселился со своего четырехсотлетнего участка недалеко от Хай-стрит в Глазго на эту более светлую и воздушную вершину холма, он приобрел лаборатории физиологии и зоологии, но слишком маленькие и скудно оборудованные".

Летом 1840 года профессор Джеймс Томсон и двое его сыновей отправились в турне по Германии. Было оговорено, что немецкий язык должен быть главным, если не единственным предметом изучения во время каникул. Но Уильям только начал изучать знаменитую книгу Фурье "Теоретический анализ Шалера" и взял ее с собой. Он прочел этот великий труд, полный новых теорем и математических процессов, с величайшим восторгом и закончил его за две недели. Результатом стала его первая оригинальная статья "О разложениях функций Фурье в тригонометрические ряды", которая датирована "Франкфурт, июль 1840 г., и Глазго, апрель 1841 г." и была опубликована в *Cambridge Mathematical Journal* (том ii, май 1841 г.). Цель статьи - показать, в каких случаях функция $f(x)$, которая должна иметь определенные произвольные значения между определенными значениями x , может быть разложена в ряд синусов, а когда в ряд косинусов. Напрашивается вывод, что для заданных пределов x , скажем, между 0 и a , и для заданных значений функции, $f(x)$ может быть выражен либо как ряд синусов, либо как ряд косинусов. Если, однако, функция должна быть рассчитана для любого значения x , которое находится за пределами той переменной, между которой присваиваются значения функции, значения $f(x)$ там должны быть найдены из принятого расширения по правилам, которые изложены в документе.

Фурье использовал синусоидальные или косинусоидальные разложения, поскольку это подходило ему для функции между пределами, и его результаты были объявлены "почти полностью ошибочными". Несмотря на это обвинение в ошибке, выдвинутое выдающимся и опытным математиком, шестнадцатилетний молодой аналитик успешно оправдал работу Фурье. Фурье был бесспорно прав, утверждая, хотя он нигде прямо не доказал, что функция, заданная для любого значения x в определенных пределах, может быть выражена либо синусоидальным, либо косинусоидальным рядом. Расхождение значений двух выражений происходит за пределами этих пределов, как было указано выше.

Следующая статья имеет ту же окончательную дату, но появилась в *Cambridge Mathematical Journal* в ноябре следующего года. В своем рассмотрении проблемы охлаждения сферы, заданной с произвольным начальным распределением температуры, симметричным относительно центра, Фурье предполагает, что произвольная функция $F(x)$, которая выражает температуру на расстояниях от центра, может быть разложена в бесконечный ряд вида

$$a_1 \sin n_1 x + a_2 \sin n_2 x + \dots$$

где $a_1, a_2, \dots$ – множители, подлежащие определению, а $n_1, n_2, \dots$ - бесконечное число корней трансцендентного уравнения $(\tan nX)/nX = 1 - hX$.

Это уравнение выражает, согласно конкретному решению дифференциального уравнения теплового потока в сфере, условие, выполняемое на поверхности, согласно которому тепло, достигающее поверхности за счет теплопроводности изнутри в любой момент времени, излучается в это время в окружающую среду. В этой второй статье Томсон рассмотрел возможность такого расширения. Он показал, что, поскольку первый из корней трансцендентного уравнения лежит между 0 и $\frac{1}{2}$, второй между 1 и $\frac{3}{2}$, третий между 2 и $\frac{5}{2}$ и так далее, при очень близком приближении к верхнему пределу по мере того, как корни становятся высокого порядка, предполагаемый ряд имеет между заданными пределами x то же значение, что и ряд

$$A_1 \text{ грех } \frac{1}{2}x + A_2 \text{ грех } \frac{3}{2}x + \dots$$

где $A_1, A_2, \dots$ известны в терминах $a_1, a_2, \dots$. И наоборот, любая серия этой формы может быть заменена серией принятой формы. Кроме того, ряд только что написанной формы может быть создан для представления любой произвольной системы значений в заданных пределах, и таким образом демонстрируется возможность расширения.

Следующие десять статей, за двумя исключениями, посвящены движению тепла и появились в *Кембриджском математическом журнале* между 1841 и 1843 годами и посвящены важным темам, предложенным трактатом Фурье. Об идеях, содержащихся в одной или двух из них, сейчас будет дан некоторый отчет.

Клерк Максвелл, сам человек с очень одухотворенными чувствами и неплохой поэт, назвал книгу Фурье великой математической поэмой. Томсон часто упоминал об этом в подобных терминах. Идея математика как поэта кому-то может показаться странной, но гений величайших математиков сродни гению истинного творца, который поистине вдохновлен. Ибо такая книга была плодом не только разума, но и воображения. В нем содержался новый метод анализа, с большим успехом примененный к решению уравнений теплопроводности, анализ, который с тех пор был перенесен в другие разделы физической математики и осветил их именно теми лучами, которые могли бы выявить структуру физических явлений. Этот метод и его приложения пришли из головы Фурье в полном развитии; он безошибочно шел по его использованию почти неизвестным путем, со всех сторон встречая подводные камни; и он достиг результатов, которые с тех пор были проверены пылливой критикой и продолжаются со времен Фурье по наши дни. Критика была тщательной и логичной: излишне говорить, что она не была поэтической.

Две другие великие работы из коллекции математических книг его отца, "*Механика Селеста*" Лапласа и "*Аналитическая механика*" Лагранжа, по-видимому, также были прочитаны примерно в это же время и произвели глубокое впечатление на ум молодого философа. Влияние этих книг можно легко проследить *в натурфилософии*.

Изучение Фурье оказало глубокое влияние на будущую работу Томсона, влияние, которое распространилось на его последние работы по теории определенных видов волн. Его трактовка основана на поразительно оригинальном использовании особой формы решения (заданной Фурье) определенного фундаментального дифференциального уравнения в теории теплового потока. Вполне вероятно, что самые ранние пристрастия Уильяма Томсона к учебе были связаны с математикой, а не с физикой. Но исследования молодого математика, ибо таковым он стал в самом реальном и высоком смысле этого слова, расширились и углубились благодаря интересу к физическим явлениям и их объяснению, вызванному лекциями Мейклхэма,

тогдашнего профессора естественной философии, и особенно (как засвидетельствовал лорд Кельвин в своей инаугурационной речи в качестве канцлера) преподаванием Дж. П. Никола, профессора астрономии, человека с поэтическим воображением и большим даром живого и ясного изложения.

The *Энциклопедия физических наук*, которую опубликовал доктор Никол, сейчас малоизвестна; но первое издание, опубликованное в 1857 году, к которому Томсон внес несколько статей, включая краткий очерк термодинамики, содержало много нового и стимулирующего для изучающих натурфилософию, и некоторое представление о достижениях его составителя и автора можно составить из его прочтения. *Дифференциальное и интегральное исчисление* Де Моргана было любимой книгой Томсона в студенческие годы, а позже, когда он учился в Кембридже, и он с удовольствием листал ее страницы перед камином, когда дневная работа заканчивалась. Много времени спустя он с благодарностью отдал дань уважения Де Моргану и его великой работе в Президентском обращении к Британской ассоциации на ее Эдинбургском собрании в 1870 году.

Следующая работа, опубликованная Томсоном, после двух, краткий обзор которых был дан выше, называлась "Равномерное движение тепла в однородных твердых телах и его связь с математической теорией электричества". Оно датировано "Ламлаш, август 1841 года", так что оно следовало за первыми двумя с интервалом всего в четыре месяца. Она появилась в *Cambridge Mathematical Journal* в феврале 1842 года и переиздана в "Перепечатке статей по электростатике и магнетизму". Это всегда будет заслуживающий внимания документ в истории физической математики. Ибо, хотя по большей части обсуждались только известные теоремы, касающиеся теплопроводности, была указана аналогия между распределением линий потока и поверхностей одинаковой температуры в твердом и неодинаково нагретом теле с источниками тепла внутри него и расположением силовых линий и эквипотенциальных поверхностей в изолирующей среде, окружающей наэлектризованные тела, которые соответствуют источникам тепла в термическом случае. Было показано, что распределение силовых линий в пространстве, заполненном изолирующими средами с различными индуктивными свойствами, в точности аналогично распределению линий теплового потока в соответствующем расположении сред с различной теплопроводностью. Таким образом, весь анализ и система решений в тепловом случае могут быть сразу перенесены в электрический. Идея "проведения силовых линий", как ее сначала называли Фарадей, а впоследствии Томсон, получила дальнейшее развитие в последующих статьях и пролила свет на всю тему электростатической силы в "поле", окружающем электрическое распределение. Более того, это сделало предмет определенным и количественным и не только дало руководство к интерпретации необъяснимых фактов, но и открыло путь к новым теоремам и дальнейшим исследованиям.

Эта статья содержит чрезвычайно важную теорему об эквивалентности, насколько это касается внешнего поля, любого распределения электричества и некоторого определенного распределения по любой эквипотенциальной поверхности количества, равного тому, которое содержится внутри поверхности. Но эта общая теорема и другие, содержащиеся в статье, были предвосхищены в "Эссе Грина о применении математического анализа к теориям электричества и магнетизма", в мемуарах Часлеса в *Журнале Лиувилля* (тома. iii и v), а также в знаменитых мемуарах Гаусса "Об общих теоремах, относящихся к силам притяжения и отталкивания, изменяющимся обратно пропорционально квадрату расстояния",

опубликованных на немецком языке в Лейпциге в 1840 году, и на английском языке в *Научных мемуарах* Тейлора в 1842 году. Об этих ожиданиях снова говорится ниже.

ГЛАВА III

КЕМБРИДЖСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ. НАУЧНАЯ РАБОТА В КАЧЕСТВЕ БАКАЛАВРА

Томсон поступил в колледж Святого Петра в Кембридже в октябре 1841 года и начал курс обучения, в то время популярный для получения математических дипломов с отличием. В то время, как и всегда, почти до наших дней, все зависело от выбора частного репетитора или "тренера", преданности ученика его указаниям и приверженности предметам программы. Его частным наставником был Уильям Хопкинс, "лучший из всех частных наставников", как назвал его один из самых выдающихся его учеников, человек больших достижений и выдающийся как оригинальный исследователь в предмете, который всегда глубоко интересовал Томсона, — внутренней жесткости земли. Но учебная программа для *tripos* не исчерпала энергию Томсона, и не было возможности полностью сосредоточить его на освоении и написании учебников, а также на решении задач того рода, которые дороги сердцу экзаменатора по математике. Он писал оригинальные статьи для *Cambridge Mathematical Journal* по вопросам чистой и прикладной математики и читал математические книги, выходящие за рамки *tripos*. Не обошел он своим вниманием легкоатлетических упражнений и забав; он выиграл Кохун, как весла гребца, и был активным членом, а позднее, во время своего пребывания в Кембридже, президент С. У. М. С., в Кембриджском университете Музыкальное общество.⁶ Музыкальными инструментами, которые он предпочитал, были корнет и особенно валторна - он был вторым валторнистом в оригинальном оркестре Peterhouse, — но, похоже, ничего не известно о трудностях или инцидентах, связанных с его практикой! Много лет спустя, в нескольких чрезвычайно интересных лекциях о звуке, которые он читал ежегодно, он рассуждал о колебаниях воздушных столбов в духовых инструментах и иногда иллюстрировал свои замечания, показывая, как меняются по высоте ноты на старомодной валторне, на которой играют рукой в колокольчике, - исполнение, которое всегда приводило в восторг слушателей курса натурфилософии.

На юбилейном мероприятии общества в 1893 году лорд Кельвин напомнил, что Мендельсон, Вебер и Бетховен были "богами" зарождающейся ассоциации. Те из его учеников, кто более близко общался с ним, помнят его глубокое восхищение этими и другими великими композиторами, особенно Бахом, Моцартом и Бетховеном, и его восторг от прослушивания их произведений. Соната Вальдштейна была особой любимицей. Ранее уже отмечалось, и, похоже, это правда, что музыка Баха и Бетховена имела особую привлекательность для многих великих математиков.

В Кембридже Томсон познакомился с Джорджем Гэбриэлом Стоксом, который в 1841 году получил звание старшего исследователя и первого лауреата премии Смита, а восемь лет спустя стал профессором математики лукасианского направления в Кембриджском университете. Их знакомство вскоре переросло в тесную дружбу, которая продолжалась до смерти Стокса в 1903 году. Старший научный сотрудник и студент Питерхауса взялись за составление серии заметок и статей по вопросам чистой и физической математики, которые требовали прояснения или

изложения новой точки зрения; и так начались общение на всю жизнь и переписка, имевшие огромную ценность для науки.

Статьи Томсона этого периода посвящены большому разнообразию тем, включая его любимую тему теплового потока. Всего их шестнадцать, которые, по-видимому, были написаны и опубликованы во время его студенческого пребывания в Кембридже. Большинство из них появилось в *Кембриджском математическом журнале* между 1842 и 1845 годами; но три появились в 1845 году в *математическом журнале Лиувилля*. Четыре посвящены предметам чистой математики, таким как теорема Дюпена о линиях кривизны ортогонально пересекающихся поверхностей, редукция общего уравнения поверхностей второго порядка (теперь называемого второй степенью), шесть посвящены различным предметам теории тепла, один - притяжению, пять - теории электричества и один - закону всемирного тяготения на поверхности вращающейся однородной жидкости. Здесь невозможно дать отчет обо всех этих бумагах. Некоторые из них представляют собой новые презентации или новые доказательства известных теорем, один или два - свежие и четкие формулировки фундаментальных принципов, которые будут использованы позже в качестве основы для более полных формулировок математической теории; но все они отмечены ясностью и энергичностью изложения.

Другая статья, опубликованная в форме письма М. Лиувиллю от 8 октября 1845 г. и опубликованная в *Математическом журнале* в том же году, указывает на то, что либо до, либо вскоре после получения степени Томсон изобрел свой знаменитый метод "Электрических изображений" для решения проблем распределения электроэнергии. Об этом методе, который является одним из самых элегантных во всем диапазоне физической математики и одним махом решает некоторые задачи, в противном случае почти неразрешимые, мы расскажем в следующей главе.

Этот послужной список потрясающ для студента, готовящегося к математическому экзамену; и в некотором роде ирония судьбы заключается в том, что такая научная деятельность в целом является скорее помехой, чем помощью в подготовке к этому сложному испытанию - экзамену. На работу Томсона возлагались большие надежды; вряд ли когда-либо прежде появлялся кандидат, проделавший так много и так блестяще оригинальной работы, и не было никаких сомнений в том, что он легко займет первое место в любом соревновании, предполагающем реальные математические способности, то есть способность справляться с новыми проблемами и выражать новые связи фактов математическим языком. Но трипо было не просто испытанием силы; это было также испытанием приобретения, а для кандидатов, практически равных в этом отношении, также памяти и быстроты воспроизведения приобретенных знаний на бумаге.

Ведущими мероприятиями были Роберт Лесли Эллис и Харви Гудвин, оба выдающиеся люди. Эллис был старшим рэнглером и первым лауреатом премии Смита за несколько лет до этого и был выдающимся математиком, который уже написал мемуары большого достоинства. Гудвин был вторым Рэнглером, когда Эллис был старшим, и стал известен более позднему поколению как епископ Карлайла. В книге "Жизнь Эллиса", приложенной к тому его собрания сочинений, Гудвин говорит: "Именно в этом году профессор У. Томсон получил ученую степень; на него возлагались большие надежды, и я помню, как Эллис с улыбкой заметил мне: "Мы с тобой как раз подходим для того, чтобы починить его ручки". " Несомненно, экзаменатор никогда не отдавал кандидату большей дани уважения!

Другая история, которая, однако, не поддается столь полному подтверждению, рассказывается о том же экзамене, или, возможно, о последовавшем за ним экзамене на премию Смита. Говорят, что определенная задача была решена практически в идентичных выражениях как Первым, так и Вторым участниками. Экзаменаторы отметили совпадение и заинтересовались его происхождением. Когда его спросили об этом, старший исследователь ответил, что видел решение, которое он дал в статье, появившейся в недавнем номере *Cambridge Mathematical Journal*; ответ Томсона заключался в том, что он был автором рассматриваемой статьи! Томсон был вторым Рэнглером, а Паркинсон - впоследствии профессором колледжа Святого Иоанна. Доктор Паркинсон, преподаватель колледжа Святого Иоанна и автор различных математических учебников, был старшим. Эти позиции поменялись местами на экзамене на призы Смита, который в целом считался лучшей проверкой оригинальных способностей, чем *tripos*, так что временное разочарование друзей Томсона было быстро забыто из-за этого более высокого успеха.

Экзамен по *Tripos* был проведен в начале января. 25 числа того же месяца Томсон встретился со своим частным преподавателем Хопкинсом на "Прогулке старших спорщиков" в Кембридже и в ходе беседы упомянул о своем желании получить копию "Эссе" Грина (см. выше, стр. 21). Хопкинс сразу же отвел его в комнаты, которые он посещал почти ежедневно в течение значительного времени в качестве ученика, изготовил не менее трех экземпляров Эссе и подарил ему один из них. Беглое прочтение показало Томсону, что все общие теоремы притяжения, содержащиеся в его статье "О равномерном движении тепла" и т.д., а также теоремы Гаусса и Часлеса, были изложены Грином и выводились из общей теоремы анализа, согласно которой определенный интеграл, взятый по пространству, ограниченному поверхностями, удовлетворяющими определенному условию, выражается в виде двух интегралов, один из которых взят по пространству, другой - по ограничивающей поверхности или поверхностям.

В предыдущей главе говорилось, что Томсон установил, как вывод из потока тепла в однородном твердом теле от распределенных внутри него источников, замечательную теорему о замене внешнего потока этих источников определенным распределением по любой поверхности однородной температуры без изменения, и указал аналог этой теоремы в электричестве. Этот метод доказательства был совершенно оригинальным и никем не ожидался, хотя теорема, как было сказано, уже была дана Грином и Гауссом. В статье, озаглавленной "Положения теории притяжения", опубликованной в *Cambridge Mathematical Journal* в ноябре 1842 года, Томсон привел аналитическое доказательство этой великой теоремы, но впоследствии обнаружил, что это было сделано почти одновременно Штурмом в журнале.

Вскоре после окончания экзаменов на премию Трипо и Смита Томсон отправился в Лондон и посетил Фарадея в его лаборатории в Королевском институте. Затем он отправился в Париж со своим другом Хью Блэкберном и провел лето, работая в знаменитой лаборатории Рено, знакомясь с Лиувиллем, Штурмом, Шаслом и другими французскими математиками того времени, а также посещая заседания Академии наук. Он ознакомил математиков Парижа с "Эссе" Грина и содержащимися в нем сокровищами и часто рассказывал спустя годы, с каким изумлением были восприняты его результаты. Он рассказывал, что однажды, когда они с Блэкберном сидели в своих комнатах, они услышали, как кто-то, тяжело дыша, поднимается по лестнице. Штурм ворвался к ним в сильном возбуждении и воскликнул: "Да здравствует моя

зеленая память! Господин Лиувиль, я люблю тебя." Он сел и перелистал страницы "Эссе", просматривая один результат за другим, пока не пришел к полному предвосхищению своего доказательства теоремы о замене. Он вскочил, указал на страницу и закричал: "*Вуаля, мое дело!*"

Впоследствии Томсон часто вспоминал об этом визите в Париж с благодарностью за доброту Реньо и восхищением его замечательным экспериментальным мастерством. Великий экспериментатор был тогда занят своими исследованиями тепловых постоянных тел с помощью сложного аппарата, который он сконструировал для себя и которым его снабдило мудрое и щедрое французское правительство. Это приобщение к лабораторной работе вскоре принесло свои плоды в виде создания физической лаборатории в Глазго, первой физической лаборатории для студентов в этой стране.

Поразительным свидетельством гениальности Томсона является то, что в возрасте всего семнадцати лет он пришел к такой фундаментальной и общей теореме притяжения и указал на ее приложения к теории электричества. И еще очень примечательно, что теорема должна была быть доказана с интервалом в два—три года тремя разными авторами, двое из которых — Штурм и Гаусс - уже были известными математиками. Подход Грина к этому вопросу был, однако, наиболее общим и далеко идущим, поскольку, как уже говорилось, теорема Гаусса, Штурма и Томсона была всего лишь частным случаем общей теоремы анализа, содержащейся в "Эссе" Грина. Было сказано в шутку, но не без правды, что физическая математика состоит из постоянных приложений теоремы Грина. Из этого чрезвычайно мощного соотношения обнаруженный совсем недавно результат, который является очень фундаментальным в теории функций комплексного переменного и который обычно цитируется как теорема Римана, является лишь частным случаем.

Томсон испытывал величайшее почтение к гению Грина и черпал вдохновение для большей части своих более поздних работ в своих воспоминаниях, а также в мемуарах Коши о распространении волн.⁷ В 1850 году он добился переиздания "Эссе" Грина в журнале Крелле; в последующие годы он часто выражал сожаление, что оно не было опубликовано в Англии.

В начале 1845 года Томсон рассказал Лиувиллю о методе *электрических изображений*, который он открыл для решения проблем распределения электроэнергии. 8 октября 1845 года, после своего возвращения в Кембридж, он написал Лиувиллю краткий отчет о результатах применения метода в ряде различных случаев, а в двух письмах, написанных 26 июня и 16 сентября следующего года, он изложил некоторые дальнейшие результаты, включая решение проблемы распределения на сферической чаше (сегменте сферической проводящей оболочки, образованном плоским сечением), изолированной и наэлектризованной. Этот последний весьма примечательный результат был приведен без доказательств и оставался недоказанным до тех пор, пока Томсон двадцать три года спустя не опубликовал свою демонстрацию в *Philosophical Magazine*.⁸ Этому предшествовала серия статей в марте, мае и ноябре 1848 г., ноябре 1849 г. и феврале 1850 г. в *Кембриджском и Дублинском математическом журнале*, посвященных различным частям математической теории электричества в равновесии,⁹ в котором рассматривается теория изображений. The letters to Liouville promptly appeared in the *Journal*, and the veteran analyst wrote a long Note on their subject, which concludes as follows: "Mon but sera rempli, je le répète, s'ils [ces développements] peuvent aider à bien faire comprendre la

haute importance du travail de ce jeune géomètre, et si M. Thomson lui-même veut bien y voir une preuve nouvelle de l'amitié que je lui porte et de l'estime qui j'ai pour son talent."

Метод изображений можно рассматривать как развитие в определенном направлении уже упоминавшейся статьи "О равномерном движении тепла", и, взятый вместе с этой последней статьей, он является наиболее ярким свидетельством силы и оригинальности его математического гения из всего ряда ранних работ Томсона. Соответственно, здесь целая глава посвящена более полному объяснению первого документа и вытекающих из него разработок. Обычный читатель может пропустить эту главу мимо ушей и возвращаться к ней время от времени по мере возможности, пока она не будет полностью понята.

ГЛАВА IV

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В РАВНОВЕСИИ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОБРАЗЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНВЕРСИЯ

При описании ранних электрических исследований Томсона мы не будем вдаваться в подробные расчеты, а просто объясним использованные методы. В первую очередь можно напомнить значение некоторых технических терминов.

Все пространство, в котором распределение электричества производит какое-либо воздействие на наэлектризованные тела, называется *электрическим полем* распределения. Сила, действующая на очень маленький изолированный пробный проводник, на котором находится электрический заряд, величина которого равна величине, принятой за единицу количества электроэнергии, измеряет *напряженность поля* в любой точке, в которой расположен проводник. Направление напряженности поля в точке - это то, в котором находится маленький проводник. Если бы заряд на маленьком проводнике был отрицательной единицей, а не положительной, направление силы было бы обратным; величина силы осталась бы прежней. Чтобы сделать напряженность поля совершенно определенной, для ее определения выбирается положительная единица измерения. Для заряда на пробном проводнике, состоящего из любого количества единиц, сила равна количеству, во столько раз превышающему напряженность поля. Напряженность поля часто определяется его компонентами, X , Y , Z в трех выбранных направлениях под прямым углом друг к другу.

Теперь во всех случаях, когда действие, будь то притяжение или отталкивание, между двумя единичными количествами вещества, сосредоточенными в точках, обратно пропорционально квадрату расстояния между зарядами, напряженность поля или его компоненты могут быть найдены из определенной функции V зарядов, образующих действующее распределение [которое всегда можно рассматривать в математических целях как систему малых зарядов, существующих в точках пространства, мы будем называть их *точечными зарядами*], их положений и положения точки, в которой должна быть найдена напряженность поля. Если q_1 , q_2 , ... быть точечными зарядами и быть положительными, когда заряды положительные, и отрицательными, когда заряды отрицательные, и r_1 , r_2 , ... быть их расстояниями от точки P , V

равно $q_1/r_1 + q_2/r_2 + \dots$. Напряженность поля - это скорость уменьшения значения V при P , взятая вдоль указанного направления. Тремя градиентами, параллельными трем выбранным направлениям координат, являются X, Y, Z ; но для их вычисления необходимо ввести значения $r_1, r_2, \dots$ в терминах координат, которые определяют положения точечных зарядов, и координат x, y, z , которые определяют положение P . Как только это будет сделано, X, Y, Z получаются простым систематическим процессом вычисления, а именно дифференцированием функции V относительно x, y, z .

Эта функция V , по-видимому, впервые была использована Лапласом для определения гравитационной материи в "*Мексиканской целесте*"; ее важность для электричества и магнетизма была признана Грином, который назвал ее *потенциалом*. Это имеет важное физическое значение. Он представляет собой работу, которую пришлось бы проделать, чтобы довести единицу положительного электричества, несмотря на электрическое отталкивание распределения, до точки P из точки, находящейся на бесконечном расстоянии от каждой части распределения; или, другими словами, то, что мы сейчас называем *потенциальной энергией* заряда q , расположенного в точке P , равно qV . Превышение потенциала в точке P над потенциалом в любой другой точке Q поля - это работа, которая должна быть затрачена на перенос положительной единицы от Q к P против электрического отталкивания. Конечно, если сила, которую необходимо преодолеть при переходе от Q к P , в целом является притяжением, то работа была потрачена не на осуществление переноса, а на то, чтобы позволить ему произойти. Тогда разница потенциалов отрицательна, то есть потенциал Q выше, чем потенциал P .

Разница потенциалов зависит только от точек P и Q , а вовсе не от пути, проходимого между ними. Таким образом, если единица электроэнергии переносится от P к Q по любому пути и обратно по любому другому, агент, несущий единицу, в целом не выполняет никакой работы. Этот простой факт исключает возможность получения так называемого вечного двигателя (самодействующей машины, выполняющей полезную работу) с помощью электрического воздействия. То же самое с *соответствующими изменениями* верно и для гравитационного воздействия.

В тепловой аналогии, объясненной Томсоном в его первой статье, положительные точечные заряды являются точечными источниками тепла, которое с постоянной скоростью изливается в среду (предположительно однородного качества) и частично отводится из среды с постоянной скоростью там, где есть *поглотители* (или отрицательные источники), - отрицательные точечные заряды в электрическом случае, - в то время как остальная часть отводится во все более отдаленные части проводящей среды, предположительно бесконечно протяженной. Всякий раз, когда точечный источник или точечный сток существует на расстоянии от других источников или стоков, поток в окрестности проходит по прямым линиям от точки или к ней, и эти прямые линии были бы бесконечно протяженными, если бы источник или сток существовали сами по себе. Как бы то ни было, направление и величина потока повсюду зависят от потока, возникающего в результате всего расположения источников и стоков. В среде могут быть нарисованы линии, которые показывают направление результирующего потока от точки к точке, и эти линии потока могут быть расположены на таком расстоянии друг от друга, чтобы указывать по их близости друг к другу или расстоянию друг от друга, где скорость потока больше или меньше; и такие линии начинаются от источников и либо заканчиваются стоками, либо продолжают свой путь до бесконечности. В электрическом случае эти линии являются аналогами электрических силовых линий (или напряженности поля)

в изолирующей среде, которые начинаются от положительных зарядов и заканчиваются отрицательными или продолжаются до бесконечности.

Поперек таких линий потока можно провести семейство поверхностей, к каждой из которых линии, пересекаемые поверхностью, перпендикулярны. Эти поверхности являются равнотемпературными поверхностями, или, как их обычно называют, изотермическими поверхностями. Их можно нарисовать более тесно расположенными друг к другу или более широко разделенными, чтобы указать, где скорость понижения температуры ("температурный наклон") больше или меньше, точно так же, как контурные линии на карте показывают склоны холмов.

Вместо тепловой аналогии с таким же успехом можно было бы использовать аналогию с установившимся течением в бесконечно протяженной массе однородной жидкости без трения и несжимаемости, в которую жидкость с постоянной скоростью вливается источниками и отводится стоками. Изотермические поверхности заменяются поверхностями с равным давлением, в то время как линии потока в одной из них также являются линиями потока в другой.

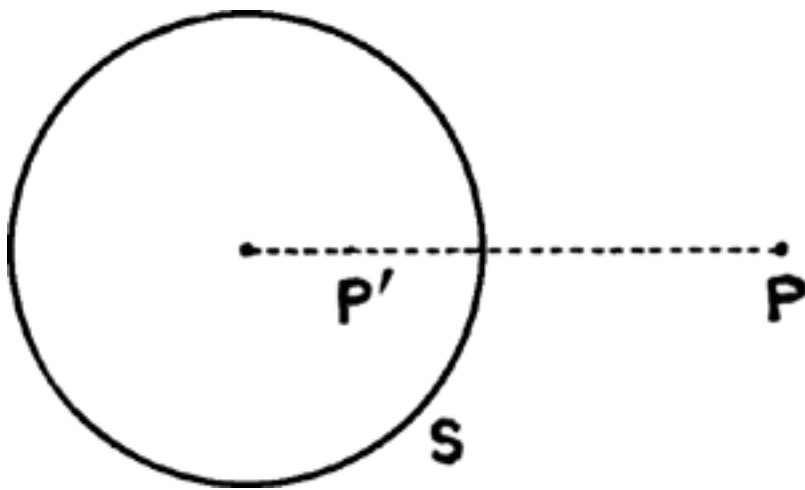


Рис. 1.

Теперь пусть тепло поступает в среду с постоянной скоростью от единственного точечного источника P (рис. 1) и отводится с меньшей скоростью единственным точечным стоком P' , в то время как остаток поступает во все более удаленные части среды, протяженность которых предполагается бесконечной во всех направлениях. По прошествии достаточного времени с начала течения для этого случая можно проследить определенную систему линий течения и изотермических поверхностей описанным выше способом. Одной из изотермических поверхностей будет сфера S , окружающая сток, который, однако, не будет находиться в центре сферы, но расположен так, что источник, сток и центр находятся на одной линии, и что радиус сферы является средним, пропорциональным расстояниям источника и стока от центра. Если a - радиус сферы, а f - расстояние источника от центра сферы, то тепло, отводимое стоком, составляет долю a/f от тепла, выделяемого источником.

В электрическом аналоге источником и стоком являются соответственно точечный заряд и то, что называется "электрическим изображением" этого заряда относительно сферы, которая в данном случае является эквипотенциальной поверхностью. И точно так же, как линии теплового потока пересекаются со сферической изотермической поверхностью под прямым углом, так и силовые линии в электрическом случае пересекаются с эквипотенциальной поверхностью также под прямым углом. Теперь очевидно, что в тепловом случае сферический сток мог бы быть расположен так, чтобы он совпадал со сферической поверхностью, чтобы принимать поступающий туда поток и отводить тепло от среды, ни в малейшей степени не нарушая поток за пределами сферы. Все поступающее количество тепла было бы одинаковым: количество, получаемое на единицу площади в любой точке сферы, очевидно, было бы пропорционально градиенту температуры там по направлению к поверхности. Конечно, то же самое можно было бы сделать на любой изотермической поверхности, и в этом случае соблюдалась бы та же пропорциональность.

Аналогично источник можно было бы заменить поверхностным распределением источников по любой окружающей изотермической поверхности; и условие, которое должно быть выполнено в этом случае, заключалось бы в том, что количество тепла, выделяемого на единицу площади в любом месте, должно быть именно таким, которое вытекает по линиям течения там в реальном случае. Эта замена не повлияет на поле течения за пределами поверхности. Очевидно, что в этом случае расход на единицу площади должен быть пропорционален отклонению температуры от поверхности наружу.

Те же утверждения справедливы для любой сложной системы источников и поглотителей. Должен быть такой же отток от изотермической поверхности или приток к ней, как и в реальном случае, и должна соблюдаться пропорциональность температурному наклону.

Это в точности аналогично замене распределения электрического заряда или зарядов внутри поверхности на эквипотенциальной поверхности распределением по поверхности с выполнением теоремы Кулона (стр. 43 ниже) на поверхности. Статья Томсона о "Равномерном движении тепла" дала интуитивное доказательство этой великой теоремы электростатики, которую приведенные выше утверждения могут помочь прояснить тем, кто обладает или желает приобрести некоторые элементарные знания об электричестве.

Возвращаясь к распределению на любой изотермической поверхности, окружающей сток (или стоки), мы видим, что оно представляет собой поверхность-сток, находящуюся в равновесии с потоком в поле. Распределение на металлической оболочке, совпадающее с поверхностью, которое поддерживает на поверхности потенциал, являющийся аналогом температуры на изотермической поверхности, в то время как оболочка находится под воздействием точечного электрического заряда - аналога источника тепла — это распределение, на которое влияет индукция точечного заряда. Если оболочка совпадает со сферической эквипотенциальной поверхностью, упомянутой выше, и на ней выполняется распределение, заданное теоремой о замене, оболочка будет иметь нулевой потенциал, а заряд будет таким, который существовал бы, если бы оболочка была неизолированной, то есть "наведенный заряд".

Рассмотрение следующей простой задачи поможет прояснить значение электрического изображения и послужит подходящим введением к описанию применения метода электрификации сферических поверхностей. Представьте себе очень большой плоский лист фольги, соединенный проводом с землей. Если поблизости нет наэлектризованных тел, лист

будет неэлектризованным. Но пусть очень маленький металлический шарик с положительным электрическим зарядом на нем поднесут умеренно близко к одной стороне фольги. Фольга будет наэлектризована отрицательно за счет индукции, и распределение отрицательного заряда будет зависеть от положения шарика. Теперь можно показать, что электрическое силовое поле на той же стороне фольги, что и шарик, в точности такое же, какое возникло бы, если бы фольгу (и все, что за ней) удалили, и равный отрицательный заряд электричества поместили за фольгой на продолжительном перпендикуляре от шарика к фольге и на таком же расстоянии от фольги сзади, на каком шар находится от нее спереди. Такой отрицательный заряд за листом фольги называется электрическим изображением положительного заряда спереди. Как будет видно, если бы фольга была зеркалом, она представляет собой оптическое изображение шара в зеркале.

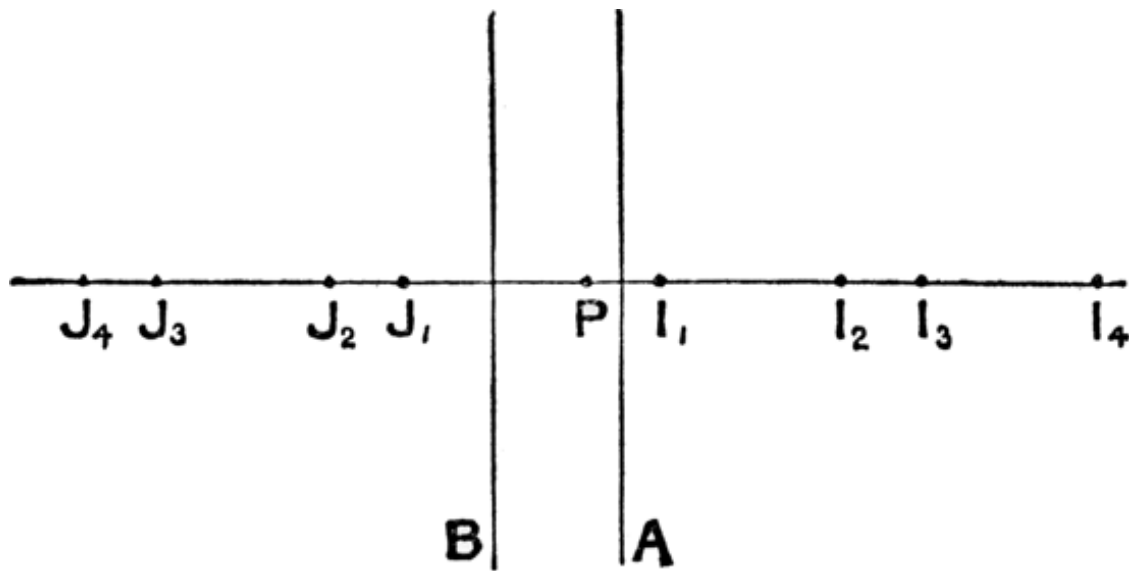


Рис. 2.

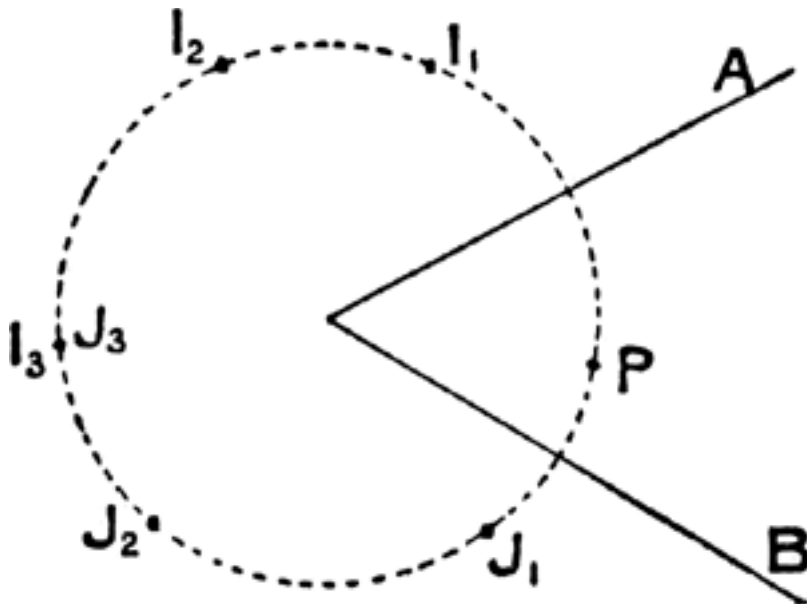


Рис. 3.

Теперь предположим, что второй очень большой лист фольги нужно поместить параллельно первому листу, так чтобы маленькая наэлектризованная сфера находилась между двумя листами, и что этот второй лист также соединен с землей. Заряд на шаре вызывает отрицательное электричество на обоих листах, но, кроме того, каждый лист своим зарядом влияет на другой. Проблема распределения намного сложнее, чем в случае с одним листом, но ее решение поддается очень простой постановке. Давайте назовем два листа *A* и *B* (рис. 2) и на данный момент рассматриваем их как зеркала. Первое изображение объекта *P* между двумя зеркалами создается непосредственно каждым из них, но изображение I_1 в *A* фактически является объектом перед *B*, а изображение I_1 в *B* является объектом перед *A*, так что в каждом случае создается второе изображение, более удаленное от зеркала, чем первое. Эти вторые изображения I_2 и I_2 таким же образом создают третьи изображения, еще более удаленные, и так далее. Положения определяются так же, как для объекта и отдельного зеркала. Таким образом, за каждым зеркалом находится бесконечный ряд изображений, места которых может назначить любое из них.

Каждый может увидеть реализацию этого устройства в витрине магазина, две стороны которой закрыты параллельными листами зеркального стекла. Бесконечная последовательность объектов в окне, по-видимому, видна с обеих сторон. Когда выставленные объекты представляют собой сверкающие новые велосипеды, выстроенные в ряд, эффект получается очень впечатляющим; но то, что нас здесь интересует, - это один маленький объект, такой как маленький шарик, и две цепочки его изображений. Электрическая сила в любой точке между двумя листами фольги точно такая же, как если бы листы были сняты и в точках изображения были помещены попеременно отрицательные и положительные заряды, отрицательные на первых изображениях, положительные на вторых изображениях и так далее, причем каждый заряд был бы таким же по величине, как и на шаре. У нас есть "электрический калейдоскоп" с параллельными зеркалами. Когда угол между проводящими плоскостями составляет аликвотную часть 360° , скажем, 60° , наэлектризованная точка и изображения расположены точно так же, как объект и его изображение в калейдоскопе Брюстера, а именно в угловых точках шестиугольника, стороны которого расположены попеременно (как показано на рис. 3) длин, вдвое превышающих расстояние от наэлектризованной точки от *A* и от *B*.

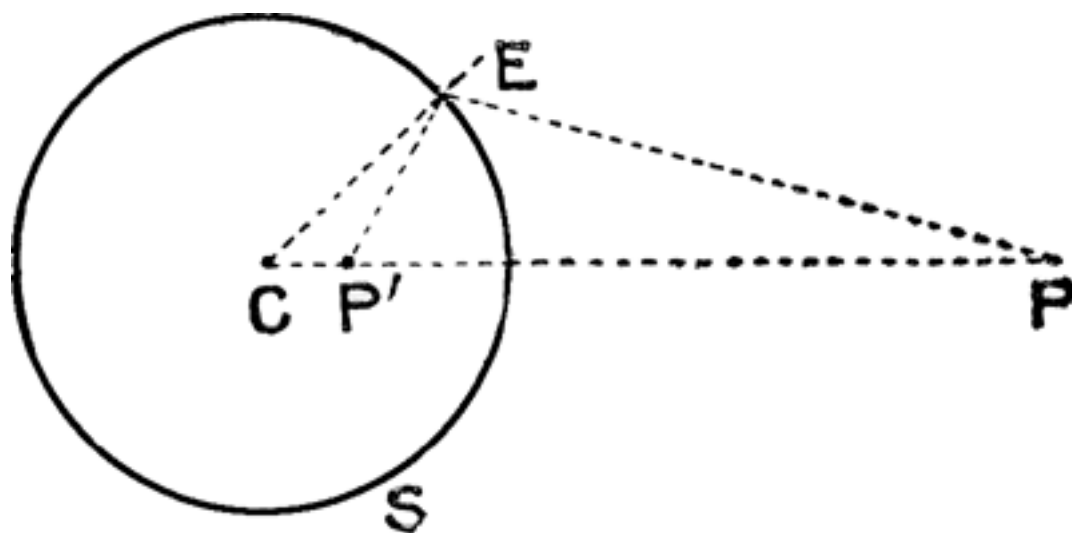


Рис. 4.

Теперь рассмотрим сферическую поверхность, упомянутую на стр. 37, которая поддерживается при постоянном потенциале зарядом во внешней точке P и зарядом q' в обратной точке P' внутри сферы. Если E (рис. 4) - любая точка на поверхности, а r, r' - ее расстояния от P и P' , то с помощью геометрии легко доказать, что два треугольника CPE и CEP' подобны, и поэтому $r' = r \cdot a/f$. [Здесь a/f используется для обозначения a разделенного f . Знак / принят вместо обычной линейки дроби, для удобства печати.] Теперь, согласно приведенному выше объяснению, потенциал, создаваемый в любой точке зарядом q в другой точке, равен отношению заряда q к расстоянию между точками. Таким образом, потенциал при E из-за заряда q при P равен q/r , а потенциал при E из-за заряда q' при P' равен q'/r' . Таким образом, если $q' = -qa/f$, то q' при P' создаст потенциал при $E = -qa/fr' = -q/r$, на величину r . Следовательно, q при P и $-qa/f$ при P' сосуществование даст потенциал $q/r + -qa/fr' = 0$ или ноль при E . Таким образом, заряд $-qa/f$, во внутренней точке P' при $+q$ при P все точки сферической поверхности будут иметь нулевой потенциал. Эти два заряда представляют собой источник и поглотитель в тепловом аналоге на стр. 37 выше.

Теперь замените S сферической металлической оболочкой, соединенной с землей длинным тонким проводом, и представьте, что все остальные проводники находятся на большом расстоянии от нее. Если это происходит под влиянием заряда q только P , на нем наводится заряд, который в присутствии P поддерживает его при нулевом потенциале. Внутренний заряд $-qa/f$ индуцированное распределение на оболочке, таким образом, эквивалентны в отношении потенциала, создаваемого любым из них на сферической поверхности; поскольку каждый из них противодействует потенциалу, создаваемому q при P . Но можно доказать, что если можно добиться распределения по эквипотенциальной поверхности для создания того же потенциала на этой поверхности, что и при заданном внутреннем распределении, то они создают одинаковые потенциалы во всех *внешних* точках, или, как обычно говорят, внешние поля одинаковы. Это часть утверждения так называемой "теоремы замещения", открытой Грином, Гауссом, Томсоном и Часлесом, как описано выше.

Теперь можно сформулировать другую часть утверждения теоремы. Кулон давно показал, что поверхностная плотность электричества в любой точке проводника пропорциональна результирующей напряженности поля непосредственно за пределами поверхности в этой точке. Поскольку поверхность на всем протяжении имеет один потенциал, эта интенсивность перпендикулярна поверхности. Пусть это обозначается через N , а s - поверхностная плотность: тогда в соответствии с обычно принятой системой единиц $4\pi s = N$.

Пусть теперь скорость уменьшения потенциала на единицу расстояния наружу (или градиента потенциала вниз) от эквипотенциальной поверхности будет определена для каждой точки поверхности, и пусть электричество распределяется по поверхности так, чтобы количество на единицу площади в каждой точке (поверхностная плотность) было численно равно градиенту там, деленному на 4π . Это, согласно закону Кулона, изложенному выше, дает ту напряженность поля непосредственно за пределами поверхности, которая существует для фактического распределения, и, следовательно, как может быть доказано, дает такое же поле везде за пределами поверхности. Таким образом, внешние поля будут эквивалентны, и, кроме того, количество электроэнергии на поверхности будет таким же, как и внутри нее при фактическом распределении.

Таким образом, необходимо только найти для $-qa/f$ при P' и q при P градиент спада N потенциала вне сферической поверхности в любой точке E и взять $N/4\pi$, чтобы получить с поверхностную плотность при E . Вычисление этого градиента для сферы дает $4\pi s = -q(f^2 - a^2)/ar^3$. Таким образом, поверхностная плотность обратно пропорциональна кубу расстояния PE .

Если точка воздействия P расположена внутри сферической оболочки, а оболочка подключена к земле, как и раньше, индуцированное распределение будет происходить на ее внутренней поверхности. Соответствующая точка P' теперь будет находиться снаружи, но задана тем же соотношением. И a теперь будет больше, чем f , и плотность будет определяться как $4\pi s = -q(a^2 - f^2)/ar^3$, где f и r имеют те же значения в отношении E и P , что и раньше.

P' в каждом случае называется изображением P в сфере S , а заряд $-qa/f$ предполагается, что там находится *электрическое изображение* заряда q при P . Будет видно, что электрическое изображение представляет собой заряд или систему зарядов на одной стороне наэлектризованной поверхности, которые создают на другой стороне этой поверхности то же электрическое поле, которое создается при фактической наэлектризованности поверхности.

Хотя согласно теореме о замене существует только одно распределение по поверхности, которое создает во всех точках на одной стороне поверхности то же поле, что и распределение D на другой стороне поверхности, это поверхностное распределение может быть эквивалентно нескольким различным расположениям D . Таким образом, точечный заряд в P' является лишь одним из различных распределений изображений, эквивалентных поверхностному распределению в объясненном смысле. Например, равномерное распределение по любой сферической поверхности с центром в точке P' (рис. 4) также подошло бы, при условии, что эта сферическая поверхность недостаточно велика, чтобы выходить за пределы поверхности S .

Чтобы определить потенциал сферы (рис. 4) при изоляции с нанесенным на нее зарядом Q , в присутствии влияющего заряда q во внешней точке P , необходимо только представить равномерно распределенный по сфере, уже наэлектризованной только что объясненным способом, заряд $Q + aq/f$. Тогда весь заряд будет Q , и равномерность распределения будет нарушена, как того требует действие влияющей точки -зарядкай. Потенциал будет составлять $Q/a + q/f$. При заданном потенциале V сферы общий заряд равен $aV - aq/f$, то есть заряд aV превышает наведенный заряд.

Если вместо единственного воздействующего точечного заряда в P имеется система воздействующих точечных зарядов в разных внешних точках, то каждый из них имеет заряд изображения, который необходимо определить по величине и положению только что описанным методом, и индуцированное распределение является тем, которое получается путем наложения всех поверхностных распределений, найденных для разных влияющих точек.

Силу отталкивания между точечным зарядом q и сферой (с общим зарядом Q) можно найти сразу, вычислив сумму сил между q при P и зарядами $Q + aq/f$ при S и $-aq/f$ при P' .

Это можно найти также путем вычисления энергии системы, которая, как будет обнаружено, состоит из трех слагаемых, одно из которых представляет энергию сферы с зарядом Q , не подверженным влиянию внешнего заряда, другое представляет энергию небольшого проводника (не точки), существующего отдельно в точке P , и третье, представляющее взаимную энергию наэлектризованности сферы и заряда q при P , существующих в присутствии друг друга.

Согласно известной теореме, энергия системы проводников равна половине суммы, полученной путем умножения потенциала каждого проводника на его заряд и сложения произведений вместе. Затем необходимо только найти изменение последнего члена, вызванное увеличением f на небольшую величину df . Это и будет продукт $F \cdot df$ требуемого усилия F и смещения.

Любой метод может быть применен для нахождения сил притяжения и отталкивания для систем наэлектризованных сфер, описанных ниже.

Проблема двух взаимно влияющих непересекающихся сфер, S_1, S_2 (рис. 5), изолированных с заданными зарядами, q_1, q_2 , теперь может быть решена следующим образом. Предположим, что сначала каждый из них заряжен равномерно. Согласно известной теореме, упомянутой выше, внешнее поле каждого из них такое же, как если бы весь его заряд располагался в центре. Теперь, если распределение, скажем, на S_2 , сохранить неизменным, в то время как распределение на S_1 разрешено изменять, действие S_2 на S_1 такое же, как если бы заряд q_2 находился в центре C_2 из S_2 . Таким образом, если f – расстояние между центрами C_1, C_2 , а a_1 – радиус S_1 , то распределение будет таким, которое соответствует $q_1 + a_1 q_2 / f$ равномерно распределено на S_1 вместе с наведенным зарядом $-a_1 q_2 / f$, что соответствует заряду изображения в точке I_1 (в пределах C_1), обратному C_2 относительно C_1 . Теперь пусть заряд на S_1 будет зафиксирован в только что предполагаемом состоянии, в то время как заряд на S_2 освобожден. Заряд на S_2 будет перестраиваться под влиянием $q_1 + a_1 q_2 / f (= q')$ and $-a_1 q_2 / f$, considered as at C_1 and I_1 , соответственно. Первый из них даст распределение, эквивалентное $q_2 + a_2 q' / f$, равномерно распределенное по S_2 , и индуцированное распределение количества $-a_2 q' / f$ в J_1 , точке, обратной к C_1 по отношению к S_2 . Заряд изображения $-a_1 q_2 / f$ при I_1 за S_1 будет реагировать на S_2 и даст индуцированное распределение $-a_2 (-a_1 q_2 / f) f'$, ($I_1 C_2 = f'$), соответствующее изображению – зарядите $a_2 a_1 q_2 / f f'$ at the inverse point J_2 of P_1 with respect to $C_2 S_2$. Таким образом, распределение на S_2 эквивалентно $q_2 + a_2 q' / f - a_2 a_1 q_2 / f f'$ at the inverse point J_2 of P_1 distributed равномерно по нему, вместе с двумя только что описанными индуцированными распределениями. В

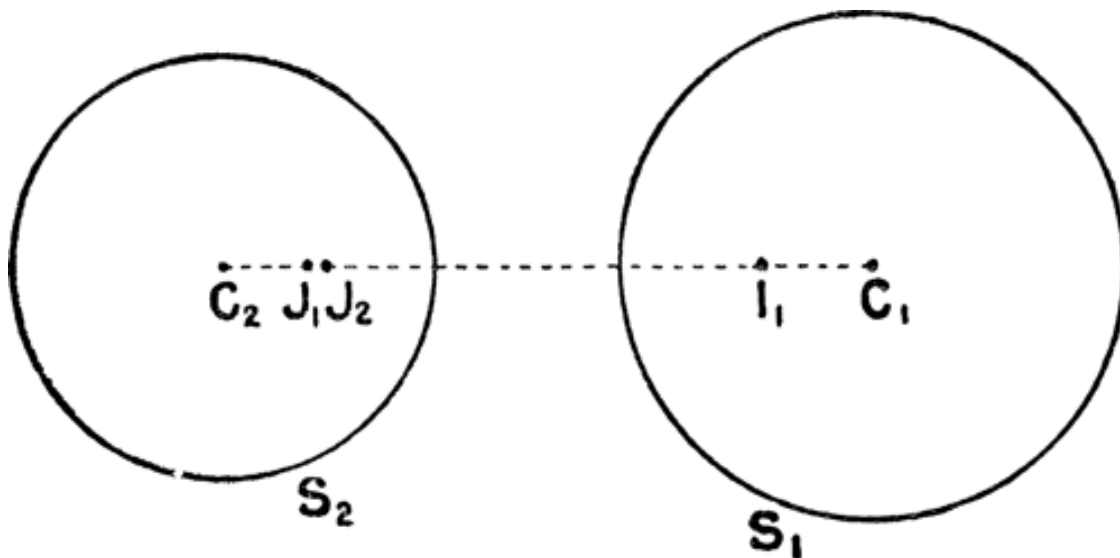


Рис. 5.

Таким же образом эти два индуцированных дистрибутивов на C_2 может теперь рассматриваться как реагирующий на распространение на C_1 , как бы точка-обвинения – $V_2 \Gamma_1 / \phi$ и $A_2 a_1 M_2 / \Phi \Phi'$, расположенный в J_1 и J_2 соответственно, и дал бы два индуцированных дистрибутива на C_1 , соответствующую их образы в C_1 .

Таким образом, путем частичных воздействий в бесконечной последовательности состояние равновесия двух сфер может быть приближено настолько близко, насколько это может быть желательно. Таким образом, получается бесконечная цепочка электрических изображений внутри каждой из двух сфер, и конечное состояние каждого проводника может быть рассчитано путем суммирования эффектов каждого набора изображений.

Если заданы конечные потенциалы, скажем, V_1, V_2 сфер, то процесс несколько упрощается. Пусть сначала предполагается, что заряды существуют, равномерно распределенные по каждой сфере, и имеют величину $a_1 V_1, a_2 V_2$ в обоих случаях. Равномерное распределение на S_1 повысит потенциал S_2 выше V_2 , и чтобы снизить потенциал до V_2 при наличии этого распределения мы должны поместить индуцированное распределение по S_2 , представленное относительно внешнего поля изображением -заряд – $a_2 a_1 V_1 / f$ (на изображении C_1 в S_2), где f – расстояние между центрами. Заряд $a_2 V_2$ on S_2 will similarly have an action on S_1 , который будет компенсирован таким же образом зарядом изображения – $a_1 a_2 V_2 / f$ на изображении C_2 в S_1 . Теперь эти два заряда изображения будут реагировать на сферы S_1 и S_2 соответственно, и должны быть уравновешены индуцированными распределениями, представленными вторыми зарядами изображения, которые должны быть найдены только что приведенным в примере способом. Они снова будут реагировать на сферы, и их придется компенсировать, как и раньше, и так далее до бесконечности. Заряды уменьшаются в количестве, и их расположение приближается все больше и больше в соответствии с определенными законами, и конечное состояние можно определить путем суммирования, как и раньше.

Силу отталкивания можно найти путем суммирования сил между всеми различными парами зарядов, которые могут быть сформированы путем взятия по одному заряду каждой системы в соответствующей точке: или ее можно получить путем вычисления энергии системы.

Метод последовательных воздействий был первоначально предложен Мерфи, но способ представления эффектов последовательных индуцированных зарядов с помощью зарядов изображения принадлежит Томсону. Однако совершенно иное решение этой проблемы возможно с помощью метода электрической инверсии Томсона.

Процесс, аналогичный только что объясненному для двух заряженных и взаимовлияющих сфер, даст распределение на двух концентрических проводящих сферах под воздействием точечного заряда q при P между внутренней поверхностью внешней и внешней поверхностью внутренней, как показано на фиг. 7. Там влияние q при P и индуцированных распределений друг на друга представлено двумя сериями изображений, одним внутри внутренней сферы и одним вне внешней. Эти заряды и положения могут быть рассчитаны на основе результата для одной сферы и точечного заряда.

Метод электрической инверсии Томсона, упомянутый выше, позволил вывести решения нерешенных задач из известных решений более простых случаев распределения. Мы даем здесь краткое описание метода и некоторых его результатов. Сначала мы должны вспомнить значение геометрической инверсии. На рис. 6 расстояния OP, OP', OQ, OQ' удовлетворяют

соотношению $OP \cdot OP' = OQ \cdot OQ' = a^2$. Таким образом, P' является (см. стр. 37) величиной, обратной точке P относительно сферы с радиусом a и центром O (обозначена пунктирной линией на рис. 6), и аналогично Q' является величиной, обратной Q относительно той же сферы и центра. O называется центром инверсии, а сфера радиуса a называется сферой инверсии. Таким образом, сфера фиг. 1 и 4 - сфера обращения для точек P и P' , которые являются обратными точками друг к другу. Для любой системы точек $P, Q, \dots$ может быть найдена другая система $P', Q', \dots$ обратных точек, и если первая система образует определенный локус, вторая сформирует производный локус, который называется обратным первой. Также, если $P', Q', \dots$ рассматривать как прямую систему, то $P, Q, \dots$ будет соответствующей обратной системой относительно той же сферы и центра. P' - это изображение P , а P - это изображение P' , и так далее, относительно одной и той же сферы и центра инверсии.

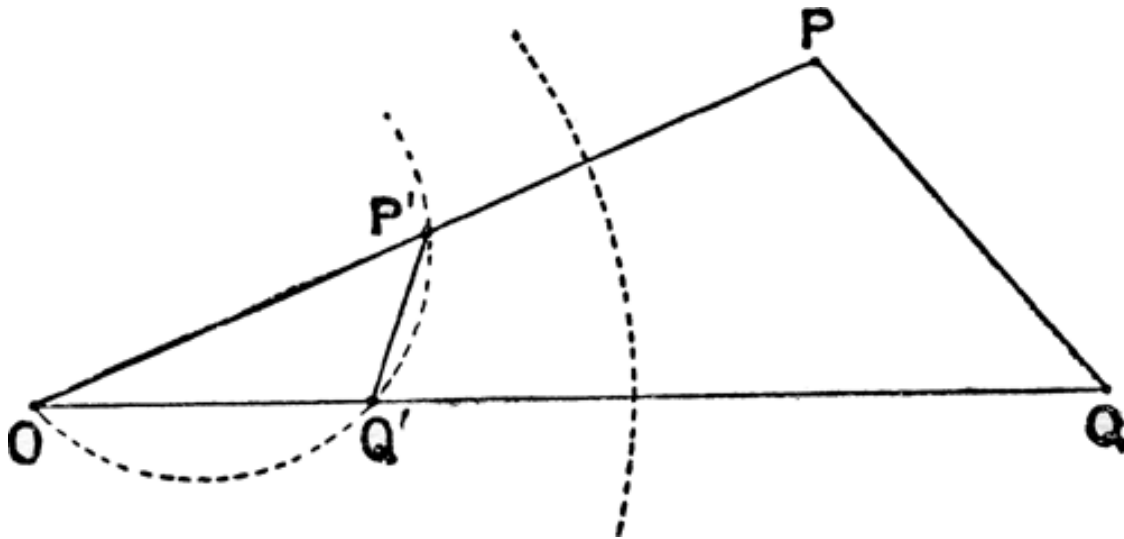


Рис. 6.

Обратная сторона круга - это другая окружность, и, следовательно, обратная сторона сферы - это другая сфера, а обратная сторона прямой - это окружность, проходящая через центр инверсии, а бесконечной плоскости - сфера, проходящая через центр инверсии. Очевидно, что обратная сторона сферы, концентрической сфере инверсии, является концентрической сферой.

Линия $P'Q'$, конечно, не является обратной к прямой PQ , обратной к которой является окружность, проходящая через три точки O, P', Q' , как показано на рис. 6.

Следующие результаты легко доказываются.

Локус и его инверсия разрезают любую линию OP под одинаковым углом.

К системе точечных зарядов $q_1, q_2, \dots$ в точках $P_1, P_2, \dots$ с одной стороны поверхности сферы обращения существует система зарядов $aq_1/f_1, aq_2/f_2, \dots$ с другой стороны сферической поверхности [$OP_1=f_1, OP_2=f_2$]. Эта обратная система, как мы будем ее называть, создает тот же потенциал в любой точке сферы обращения, что и прямая система, из которой она получена.

Если V, V' - потенциалы, создаваемые всей прямой системой при Q и всей обратной системой при Q' , $V'/V = r/a = a/r'$, где $OQ=r, OQ'=r'$.

Таким образом, если V постоянна на любой поверхности S' , V' не является постоянной на обратной поверхности S' , если только r не является постоянной, то есть если поверхность S' не является сферой, концентрической сфере обращения, и в этом случае обратная поверхность концентрична ей и является эквипотенциальной поверхностью обратного распределения.

Далее, если q распределить по элементу dS поверхности, обратный заряд aq/f будет распределен по соответствующему элементу dS' обратной поверхности. Но $dS'/dS = a^4/f^4 = f'^4/a^4$, где f, f' - расстояния O от dS и dS' . Таким образом, если s - плотность на dS , а s' - обратная плотность на dS' , мы имеем $s'/s = a^3/f'^3 = f^3/a^3$.

Когда V является постоянным на прямой поверхности, в то время как r имеет разные значения для разных направлений OQ , различные точки обратной поверхности можно свести к нулевому потенциалу, поместив в O заряд $-aV$. Ибо это создаст при Q' потенциал $-aV/r'$, который при V' даст при Q' нулевой потенциал. Это показывает, что V' - это потенциал индуцированного распределения на S' из-за заряда $-aV$ в O , или что $-V'$ - это потенциал, обусловленный индуцированным зарядом на S' , создаваемым зарядом aV в O .

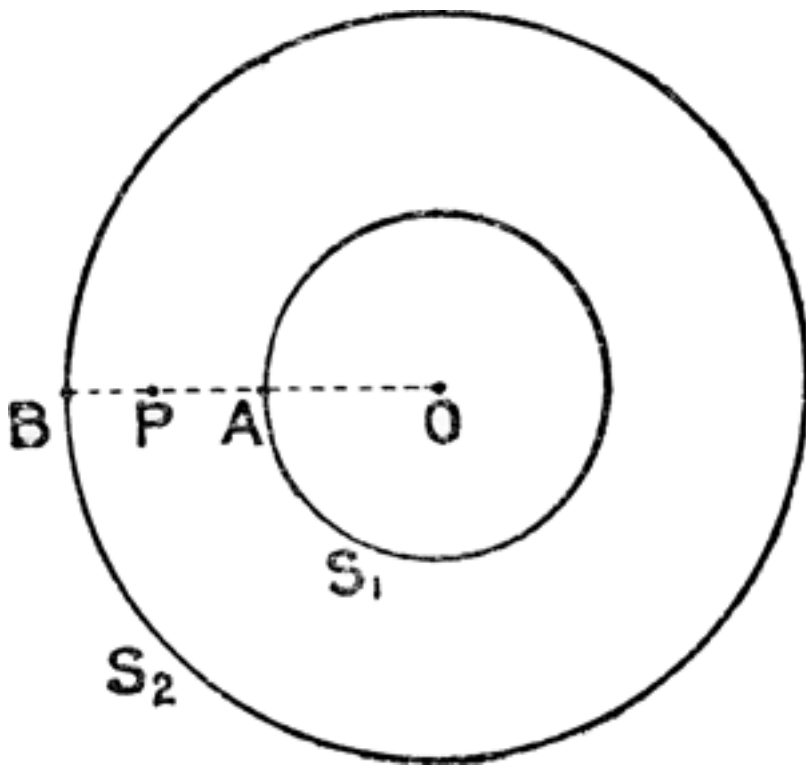


Рис. 7.

Таким образом, мы приходим к выводу, что в процессе инверсии мы получаем из равновесного распределения на проводнике любой формы индуцированное распределение на обратной поверхности, предполагаемой изолированной и проводящей; и наоборот, мы получаем из данного индуцированного распределения на изолированной проводящей поверхности естественное равновесное распределение на обратной поверхности. В каждом случае индуцирующий заряд расположен в центре инверсии. Заряды на проводнике (или проводниках) после инверсии всегда можно получить сразу из того факта, что они являются обратными

зарядам на проводнике (или проводниках) в прямом случае, а поверхностные или объемные плотности могут быть найдены из соотношений, указанных выше.

Теперь рассмотрим случай двух концентрических сфер, изолированных и подверженных воздействию точечного заряда q , размещенного в точке P между ними, как показано на рис. 7. Мы видели на стр. 49, как индуцированное распределение и величина заряда на каждой сфере получены из двух сходящихся серий изображений, одно за пределами внешней сферы, другое внутри внутренней сферы. Мы здесь не вычисляем плотность распределения в какой-либо точке, поскольку наша цель – только объяснить метод; но величины на сферах S_1 и S_2 соответственно равны $-q \cdot OA \cdot PB / (OP \cdot AB)$, $-q \cdot OB \cdot AP / (OP \cdot AB)$.

Можно заметить, что сумма индуцированных зарядов равна $-q$, и что, поскольку радиусы обеих сфер бесконечно велики, а расстояние AB остается конечным, соотношения OA/OP , OB/OP приближается к единице, а заряды к $-q \cdot PB/AB$, $-q \cdot AP/AB$, то есть заряды обратно пропорциональны расстояниям P от ближайших точек двух поверхностей. Но когда радиусы делаются бесконечно большими, мы имеем случай двух бесконечных плоских проводящих поверхностей с точечным зарядом между ними, который мы описали выше.

Теперь пусть это индуцированное распределение на двух концентрических сферах будет инвертировано из P как центра инверсии. Мы получаем две непересекающиеся сферы, как показано на рис. 5, для обратной геометрической системы, а для обратной электрической системы равновесное распределение на этих двух сферах в присутствии друг друга и заряженные зарядами, обратными индуцированным зарядам. Они поддерживают систему из двух сфер с единым потенциалом. От этой инверсии можно перейти, как показано Максвеллом в его *Электричестве и магнетизме*, том I, § 173, к распределению на двух сферах при двух различных потенциалах; но мы показали выше, как проблема может быть решена непосредственно методом изображений.

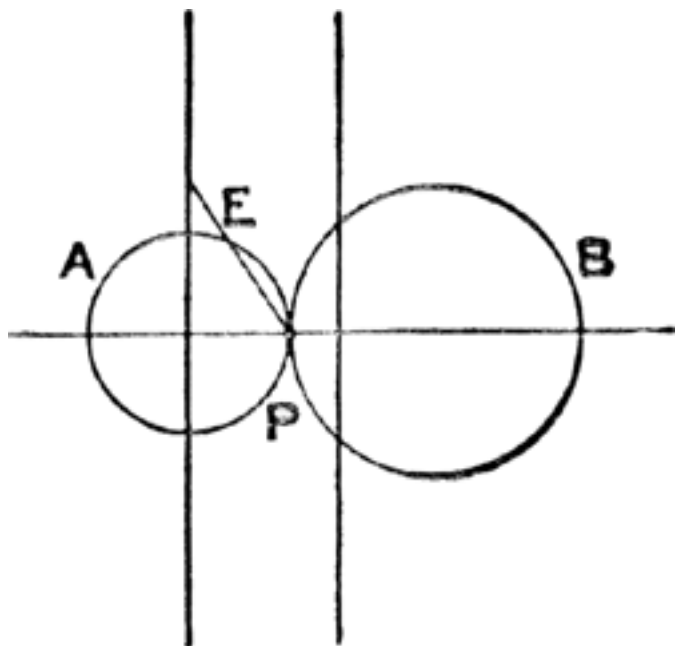


Рис. 8.

Снова возьмем случай двух параллельных бесконечных плоскостей под воздействием точечного заряда между ними. Эта система, инвертированная от P как центра, дает равновесное распределение на двух контактирующих заряженных изолированных сферах (рис. 8); поскольку эта система является инверсией плоскостей и зарядов на них. Другой интересный случай связан с "электрическим калейдоскопом", упомянутым выше. Здесь две бесконечные проводящие плоскости наклонены под углом $360^\circ/n$, где n - целое число, и поэтому ограничены в одном направлении прямой линией, которая является их пересечением. Точки изображения $I_1, J_1, \dots$, из P , расположенные под углом между плоскостями, расположены так, как показано на рис. 3, и имеют число $n - 1$. Эта система, перевернутая от P как центра, дает две сферические поверхности, которые пересекаются друг с другом под тем же углом, что и плоскости. Эта система представляет собой систему электрического равновесия в свободном пространстве, и поэтому проблема распределения на двух пересекающихся сферах решена, по крайней мере, для случая, когда угол пересечения составляет аликвотную часть 360° . Когда плоскости расположены под прямым углом, результатом является то, что для двух перпендикулярно пересекающихся плоскостей, для которых рис. 9 приведена диаграмма.

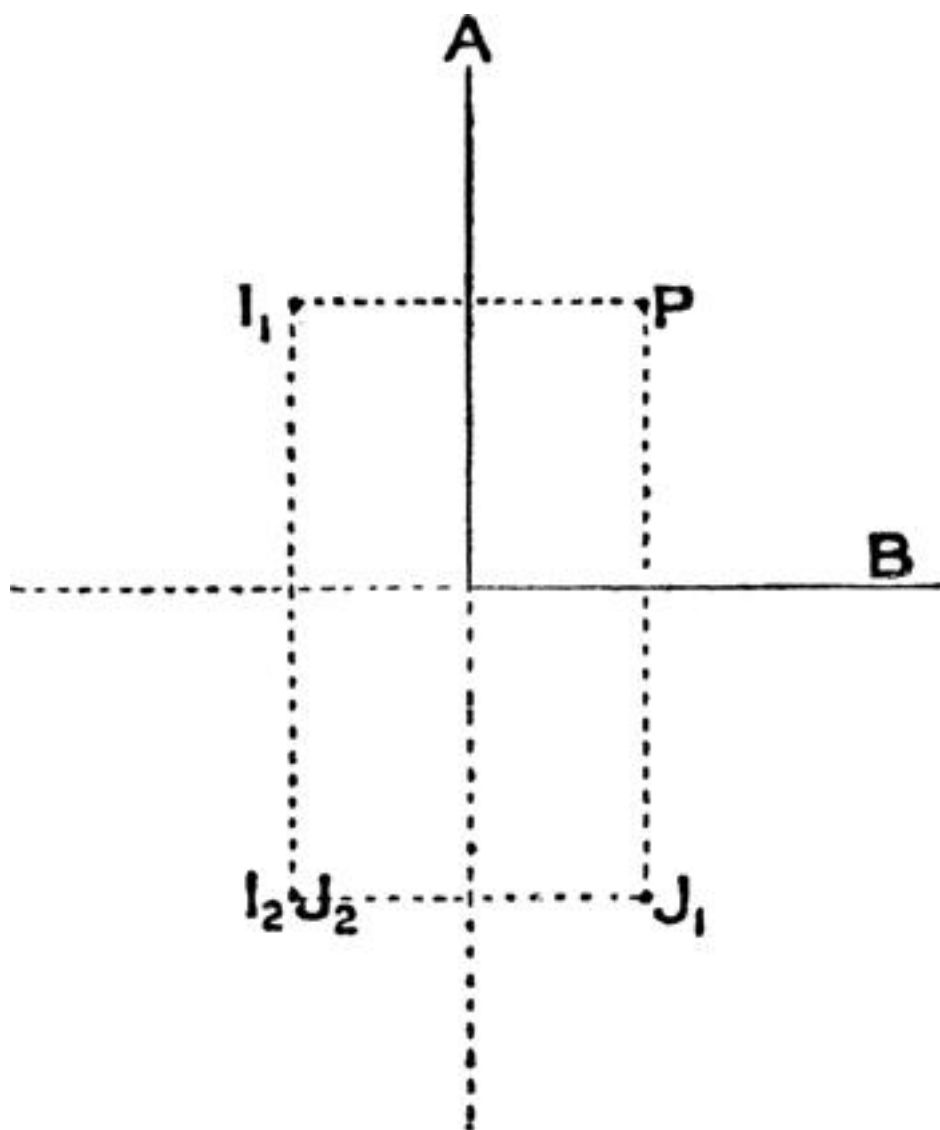


Рис. 9.

Но самым большим достижением метода было определение распределения на отрезке тонкой сферической оболочки с ребром в одной плоскости. Решение этой проблемы было сообщено М. Лиувиллю в письме от 16 сентября 1846 года, упомянутом выше, но без доказательств, которые, как заявил Томсон, у него не было времени написать из-за подготовки к началу исполнения им своих обязанностей профессора естественной философии в Глазго 1 ноября 1846 года. Она не поступала до декабря 1868 и января 1869 годов; и за это время задача не была решена ни одним другим математиком.

В качестве отправной точки для этого исследования требуется распределение на тонком плоском круговом диске радиуса a . Это можно получить, рассматривая диск как предельный случай сплюснутого эллипсоида вращения, заряженного, скажем, до потенциала V . Если на рис. 10 изображен диск, а P - точка, в которой ищется плотность, так что $CP=r$, а $CA=a$, плотность равна $V\{2\pi^2\sqrt{(a^2-r^2)}\}$.

Соотношение q/V , отношение заряда к потенциалу, которое называется электростатической емкостью проводника, таким образом, равно $2a/\pi$, то есть $a/1,571$. Как отмечает Томсон в своей статье, очень примечательно, что достопочтенный Дж. Генри Кавендишу давно следовало бы экспериментально установить с помощью самого грубого прибора, что электростатическая емкость диска равна $1 \approx 1,57$ от величины сферы того же радиуса.

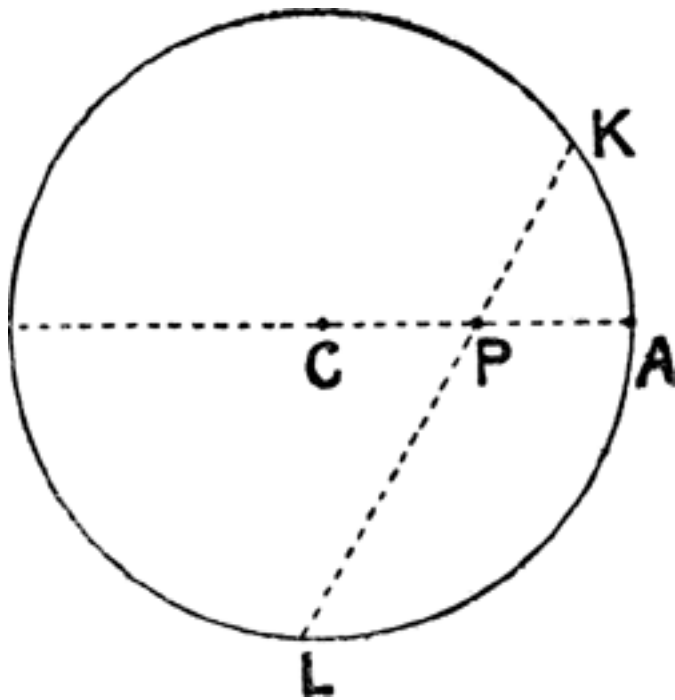


Рис. 10.

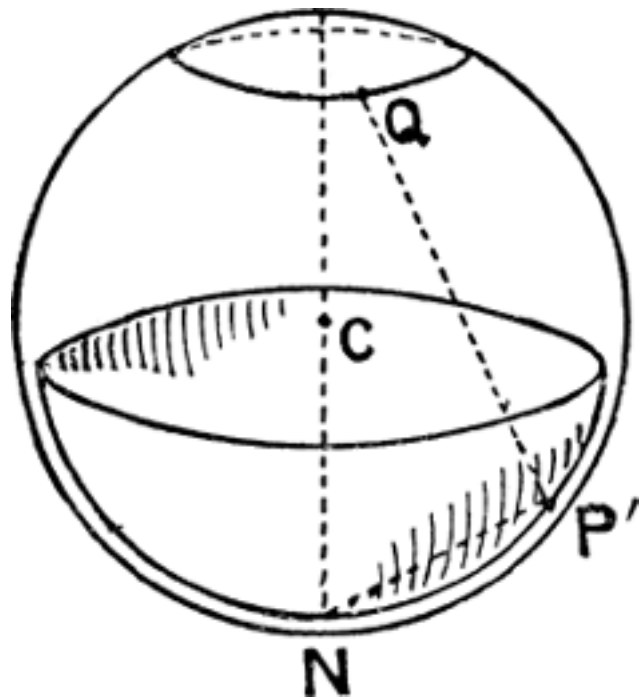


Рис. 11.

Теперь инвертируем это распределение по диску с любой точкой Q в качестве центра инверсии и с радиусом инверсии a . Геометрическая инверсия - это отрезок сферической поверхности, который проходит через Q . Обратное распределение - это индуцированное распределение на неизолированной проводящей оболочке, совпадающее с сегментом и находящееся под воздействием V заряда, Q (Fig. 11,,). Назовем эту проводящую оболочку "чашей". Если поверхностные плотности в соответствующих точках диска и на обратной стороне, скажем, в

точках P и P' , равны s и s' , то, как указано на странице 51, $s' = sa^3/QP^3$. Если мы введем значение s , указанное выше, то значение s' можно представить в форме, заданной Томсоном, которая, важно отметить, не зависит от радиуса сферической поверхности. Это выражение применимо к другой стороне чаши, поскольку плотности в близких точках на противоположных сторонах плоского диска равны.

Если v, v' – потенциалы в любой точке R пространства, обусловленные диском и его изображением соответственно, - $v' = av/QR$. Если тогда R совпадет с точкой P' на сферическом сегменте, мы имеем (с тех пор $v=V$) $V' = aV/QP'$, что является потенциалом, обусловленным индуцированным распределением, вызванным зарядом – aV при Q , как уже указывалось.

Тот факт, что значение s' не зависит от радиуса, позволяет предположить, что радиус бесконечен, и в этом случае мы имеем решение для круглого диска без изоляции, находящегося под воздействием электрического заряда в точке Q в той же плоскости, но за пределами ограничивающей окружности.

Теперь рассмотрим две части сферической поверхности, чашу B и оставшуюся часть S сферической поверхности. Q с зарядом – aV можно рассматривать как расположенный на последней части поверхности. Любые другие влияющие заряды, расположенные на S , приведут к распределению на чаше, которое должно быть найдено, как описано выше, и результирующая индуцированная электризация может быть найдена из них путем суммирования. Если S быть равномерно наэлектризованным до плотности s и оставаться таким наэлектризованным, индуцирующее распределение будет таким, какое задается *интегрированием* по всей S , и чаша B будет иметь нулевой потенциал под влиянием этой наэлектризованности S , точно так же, как если бы B была заменена металлической оболочкой, соединенной с землей длинной тонкой проволокой. Плотности равны в бесконечно близких точках по обе стороны от B .

Пусть чаша представляет собой тонкую металлическую оболочку, соединенную с землей длинной тонкой проволокой и окруженную концентрической сплошной оболочкой диаметром f больше диаметра сферической поверхности, и пусть эта оболочка будет жестко наэлектризована с поверхностной плотностью – s . Внутри этой оболочки не будет никакой силы из-за ее собственной наэлектризованности, и, следовательно, это не приведет к изменению распределения внутри. Но потенциал внутри будет равен – $2\pi fs$, ибо заряд равен – $\pi f^2 s$, а емкость оболочки равна $\frac{1}{2}f$. Потенциал чаши теперь будет равен нулю, и ее электрификация просто нейтрализует потенциал – $2\pi fs$, то есть это будет именно та свободная электрификация, которая требуется для получения потенциала $2\pi fs$.

Чтобы найти эту электризацию, пусть значение f лишь бесконечно мало превышает диаметр сферической поверхности, частью которой является B ; тогда чаша находится под влиянием (1) равномерной электризации плотности – s бесконечно близко к ее внешней поверхности, и (2) равномерной электризации той же плотности, которую можно рассматривать как на поверхности, названной S выше. Очевидно, что с помощью (1) создается плотность s на внешней поверхности чаши, и никакого другого эффекта; с помощью (2) создается равная плотность в бесконечно близких точках на противоположных сторонах чаши, которую мы видели, как рассчитать. Таким образом, полностью определяется распределение по свободно наэлектризованной чаше и может быть легко рассчитана плотность. Значение приведено в документе Thomson.

Интересные результаты получаются при уменьшении S все больше и больше, пока оболочка не станет полной сферой с круглым отверстием в ней. Сведенные в таблицу результаты для различных относительных измерений S можно найти в статье Томсона "Перепечатка документов", статьи V, XIV, XV. Также читатель найдет там полные сведения о математических расчетах, указанных в этой главе, и распространение метода на случай возмущающей точки, расположенной не на сферической поверхности, частью которой является оболочка.

Дальнейшие разработки проблемы были разработаны другими авторами, и дополнительную информацию со ссылками можно найти в "*Электричестве и магнетизме*" Максвелла, цитата

Не совсем ясно, открыл ли Томсон *геометрическую* инверсию независимо или нет: весьма вероятно, что он это сделал. Его письмо Лиувиллю от 8 октября 1845 года, безусловно, читается так, как будто он утверждал о геометрическом преобразовании, а также о применении к электричеству. Лиувилль, однако, в своей заметке, в которой он подробно останавливается на аналитической теории трансформации, говорит: "Трансформация не является агитационной, она заключается в остальном и в простом; это цель для M. Thomson lui-même a jadis employée sous le nom de principe des *images*." В *Натурфилософии* Томсона и Тейла, § 513, ссылка на метод такова: "Независимо от специального применения электричества, метод изображений дает замечательный вид преобразования, который часто бывает полезен. Это предполагает для простой геометрии то, что было названо преобразованием с помощью обратных радиус-ректоров, то есть..." Затем Максвелл в своем обзоре "Перепечатки статей" (*Nature*, vol. vii), сославшись на тот факт, что решение проблемы сферической чаши оставалось не продемонстрированным с 1846 по 1869 год, говорит, что геометрическая идея инверсии, вероятно, была открыта и переоткрывалась неоднократно, но, по его мнению, большинство этих открытий были сделаны позже 1845 года, даты первой статьи Томсона.¹⁰

Очень общий метод нахождения потенциала в любой точке области пространства, ограниченной данной границей, был изложен Грином в его "Эссе" для случая, когда потенциал известен для каждой точки границы. Успех метода зависит от нахождения определенной функции, которая теперь называется функцией Грина. Когда это известно, потенциал в любой точке сразу получается интегрированием по поверхности. Метод изображений Томсона сводится к нахождению для случая области, ограниченной одной или несколькими сферическими поверхностями, правильного значения функции Грина. Метод Грина был успешно применен в более сложных случаях и в настоящее время является мощным методом решения широкого круга задач в других отделах физической математики. Томсон получил копию статьи Грина только в январе 1845 года и, вероятно, разработал свои решения совершенно независимо от каких-либо идей, вытекающих из общей теории Грина.

ГЛАВА V

КАФЕДРА ЕСТЕСТВЕННОЙ ФИЛОСОФИИ В ГЛАЗГО. СОЗДАНИЕ ПЕРВОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

У профессора Мейклхэма, заведующего кафедрой натурфилософии в Университете Глазго, в течение нескольких лет ухудшалось здоровье, и с 1842 по 1845 год его обязанности исполнял другой представитель рода Томсонов, мистер Дэвид Томсон, бакалавр Тринити-колледжа в

Кембридже, впоследствии профессор натурфилософии в Абердине. Доктор Мейклхэм умер в мае 1846 года, и после этого профессорско-преподавательский состав по приглашению доктора Дж. П. Никола, профессора астрономии, приступил к рассмотрению вопроса о том, не возникло ли в связи с большими достижениями физической науки за предшествующую четверть века срочной необходимости изменить систему преподавания натурфилософии в Университете. Прогресс науки действительно был очень велик. Эрстед и Ампер, Генри и Фарадей, Реньо, Гаусс и Вебер совершили открытия и внедрили количественные идеи, которые изменили весь аспект экспериментальной и математической физики. Электрические открытия того времени оказали влияние на другие разделы натурфилософии и в немалой степени на саму математику. В результате прогресс того периода продолжался и увеличивался быстрыми темпами, до сих пор накопленные результаты, по большей части уже объединенные в рамках рациональной теории, были далеко за пределами возможностей какого-либо отдельного человека следовать им, не говоря уже о том, чтобы овладеть ими.

Интересно ознакомиться с курсом лекций, подобных тем, которые обычно читались в университетах сто лет назад профессором естественной философии. Мы находим небольшое обсуждение механики, гидростатики и пневматики, немного тепла и совсем немного оптики. Едва ли можно было сказать, что электричество и магнетизм, о которых в наши дни имеется литература, намного превосходящая литературу по всей физике всего шестьдесят лет назад, существуют. Профессор начала девятнадцатого века, когда был назначен предшественник лорда Кельвина, очевидно, считал себя вполне свободным посвящать значительную часть каждой лекции размышлениям о красотах природы и риторическим выступлениям, более подходящим для кафедры, чем для лекционного стола по физике.

За прошедшее время форма и стиль научных лекций полностью изменились, и это изменение свидетельствует о прогрессе науки. Это видно даже по конструкции аппарата. Микроскопы, например, обладают совершенством и мощностью, о которых наши прадеды и не мечтали, и они установлены на подставках, которые лишены украшений того ушедшего времени, но обладают стабильностью и удобством. Все и вся — даже профессор, если это возможно, — должны вести себя по-деловому; и каждый момент времени должен использоваться в экспериментах для демонстрации, а не для аплодисментов, и в кратких и убедительных изложениях теории и фактов. Тратить время на разговоры, которые не относятся к делу, преступно. Но при этом необходимы изящество выражения и живость описания, ясность изложения, воображение, даже поэтическая интуиция: но суровая красота современной науки лишь обезображена старыми искусственными украшениями и неуместностью.

Таков тон и характер науки в наши дни: задача огромна, времени мало. И шестьдесят лет назад какой-то оттенок того же склада мыслей был замечен у научных работников и преподавателей. Профессорско-преподавательский состав согласился с доктором Никол в том, что необходимо привести преподавание физики и оборудование в соответствие с состоянием науки того времени; но они мудро решили ничего не предпринимать до тех пор, пока не назначат профессора натурфилософии, который смог бы дать им полный и детальный совет. Однако они решили внести в это назначение такие изменения в структуру департамента, которые впоследствии они могли бы счесть желательными.

11 сентября 1846 года профессорско-преподавательский состав собрался и, рассмотрев резолюции, предложенные доктором Николом, постановил, что предстоящее назначение не

должно наносить ущерба праву факультета инициировать или поддерживать во время пребывания в должности нового профессора такие изменения в механизмах преподавания физических наук, какие было бы целесообразно принять, и что об этой резолюции следует сообщить избранному кандидату. Далее в протоколе говорится: "Профессорско-преподавательский состав обсудил соответствующие квалификации джентльменов, которые объявили себя кандидатами на эту кафедру, и после проведенного голосования единогласно проголосовал за мистера Уильяма Томсона, бакалавра, члена Колледжа Святого Петра в Кембридже и бывшего студента этого университета, который, соответственно, объявлен должным образом избранным: и мистер Томсон, находясь по вызову, появился на факультете, и после того, как ему зачитали весь этот протокол, он согласился с решением факультета, изложенным выше, и принял должность ". Также было принято следующее решение: "Настоящим факультет предписывает мистеру Томсону написать эссе на тему" *О распределении калорий по всему земному корпусу*" и постановляет, что его прием состоится во вторник, 13 октября, при условии, что Собрание признает его компетентным, принесет присягу и подпишется, как того требует закон".

В то время, и вплоть до последних пятнадцати лет, каждый профессор перед вступлением на свою кафедру должен был представить сочинение на латыни по какому-либо предписанному предмету. Это был почти последний пережиток обычаев тех дней, когда университетские лекции читались на латыни, практика, которая, по-видимому, была впервые нарушена Адамом Смитом в бытность профессором моральной философии. Как бы там ни было в восемнадцатом веке, сочинение по латыни в конце девятнадцатого, возможно, едва ли было безошибочным критерием латиноамериканства избранного профессора, и было бы лучше отказаться от него. Но за пятьдесят лет до этого и долгое время после классические языки занимали значительное место в учебной программе каждого студента шотландских университетов, и, несомненно, большинство из тех, кто впоследствии достиг высот на других факультетах, в свое время хорошо зарекомендовали себя в старой *Гуманитарной литературе*. Как мы видели, это относилось и к Томсону, и маловероятно, что форма его первой диссертации стоила ему гораздо больших усилий, чем ее содержание.



Профессор УИЛЬЯМ ТОМСОН, 1846 г.

Выбранная тема, без сомнения, имела отношение к работам по теории теплоты, которые мистер Томсон уже опубликовал. Диссертация была представлена факультету в назначенный день и одобрена, и мистер Томсон предъявил свидетельство о том, что он принес присягу правительству, и пообещал подписать формулу Шотландской церкви, как того требует закон, при первой удобной возможности: "затем ему была дана следующая присяга, которую он принял и подписал: *"Эго, Гулиельмус Томсон, бакалавр, профессор физики в hac Academia designatus, promitto sancteque polliceor me in munere mihi demandato studiose fideliterque*

versaturum. Затем профессор Томсон был "торжественно принят всеми присутствующими и занял свое место в качестве преподавателя".

Ни один перевод этого эссе так и не был опубликован, но его содержание содержалось в различных статьях, которые появились позже. Следующая ссылка на это сделана во введении, приложенном к статье XI его *математических и физических работ* (том i, 1882).

"Применение к земной температуре принципа, изложенного в первой части этой статьи, относящейся к возрасту тепловых распределений, стало предметом первой диссертации автора по случаю его вступления в должность профессора естественной философии в Университете Глазго в октябре 1846 года "*О калорийности воздуха в земном корпусе*"¹¹: который, более полно развитый впоследствии, дал весьма решительное ограничение возможному возрасту земли как места обитания живых существ; и доказал несостоятельность огромных утверждений о ВРЕМЕНИ, которые, не сдерживаемые физической наукой, геологи и биологи начали выдвигать и рассматривать как неоспоримые. Смотрите "Временное охлаждение Земли, геологическое время" и несколько других статей ниже ". Некоторые аргументы в пользу этого ограничения будут приведены позже. [См. Главу XIV.]

Таким образом, в возрасте двадцати пяти лет Томсон приступил к тому, что должно было стать делом его жизни в качестве учителя, исследователя и изобретателя. Ибо он оставался на своем посту пятьдесят три года, так что совокупный срок полномочий его предшественника и его самого составил всего на четыре года меньше, чем столетие! Он приступил к своим обязанностям на открытии сессии колледжа в ноябре и сразу же привлек внимание профессорско-преподавательского состава к недостаткам оборудования, которому было позволено отставать от времени, и потребовалось добавить к нему много новых инструментов. Был назначен комитет для рассмотрения этого вопроса и составления отчета, и в результате представления этого комитета в распоряжение профессора Томсона была передана сумма в размере 100 фунтов стерлингов для удовлетворения его самых насущных потребностей. В последующие годы были поданы неоднократные заявки на получение дополнительных грантов, и были проголосованы различные суммы — в общей сложности не более 500 или 600 фунтов стерлингов, — которые, очевидно, рассматривались как (и, несомненно, были, учитывая время и средства, имевшиеся в распоряжении факультета) щедрые ассигнования на преподавание физических наук. Интересен протокол заседания профессорско-преподавательского состава, датированный 26 ноября 1847 года.

После "решительного осуждения" любой идеи о том, что такие большие ежегодные расходы на какую-либо одну кафедру должны были регулярно планироваться, комитет ссылается в своем отчете на "неадекватное состояние рассматриваемой кафедры" и выражает свое удовлетворение "разумной манерой, с которой профессор естественной философии во всех случаях с готовностью изменял свои требования в соответствии с экономическими предложениями комитета". В заключение они говорят, что "с величайшим удовольствием наблюдают за его рвением и тревогой в занятиях своей профессией" и "искренне разделяют те ожидания относительно его будущей знаменитости, которые внушает Монср. Сервиль,¹² Французский математик недавно счел нужным опубликовать для научного мира."

Снова, в апреле 1852 года, факультет соглашается выплатить сумму в 137 фунтов стерлингов 6с. 1½д. в качестве цены уже произведенных закупок философского аппарата и одобряет предложение комитета о том, что расходы на это в течение следующего года не должны

превышать 50 фунтов стерлингов, и "они желают, чтобы закупки производились, насколько это возможно, с ранее полученного согласия комитета". Легко представить, что пылкий молодой профессор натурфилософии счел неторопливые методы своих старших коллег слишком медленными и в своем энтузиазме ожидал согласия на свои требования, заказав свои новые инструменты, не дожидаясь комитетов, собраний и отчетов.

В речи на открытии физических и химических лабораторий Университетского колледжа Северного Уэльса 2 февраля 1885 года сэр Уильям Томсон (как он тогда назывался) следующим образом отозвался о своем раннем оборудовании и работе: "Когда я стал профессором естественной философии в Глазго, я обнаружил аппаратуру очень старомодного вида. Большой части из них было больше ста лет, немногим меньше пятидесяти, и большая их часть была изъедена червями. Тем не менее, с помощью таких приспособлений год за годом студенты, изучающие натурфилософию, собирались вместе и обучались как можно лучше. Принципы динамики и электричества были хорошо проиллюстрированы и хорошо преподаны, так же хорошо, как и лекции, и поэтому несовершенный аппарат — но аппарат просто лекционно-иллюстративного типа — мог преподавать. Но не было абсолютно никаких условий для экспериментальных исследований, не говоря уже о какой-либо идее, даже для чего-либо вроде практической работы студентов. О студенческих лабораториях по физическим наукам тогда еще не думали".¹³

Похоже, что класс натурфилософии (тогда, как правило, по любому предмету проводился только один урок, хотя дополнительная работа выполнялась различными способами) собирался для систематических лекций в 9 утра, чего до сих пор придерживались, и для того, что называлось "Экспериментальной физикой", в 8 часов вечера!

В *Университетском календаре* на 1863-4 годы говорится, что "Занятия по натурфилософии проводятся два часа в день, с 9 до 11 часов утра. Первый час в основном посвящен изложению принципов, описанию результатов наблюдений и экспериментальным иллюстрациям. Второй час посвящен математическим демонстрациям и упражнениям, а также экзаменам по всем разделам Курса.

"Будут использованы следующие учебники: "Элементы динамики" (первая часть уже готова), отпечатанные Джорджем Ричардсоном, университетским типографом. "Элементы натуральной философии" профессоров У. Томсона и П. Г. Тейта (Два трактата будут опубликованы до ноября. Макмиллан.¹⁴)

"Более короткий из последних упомянутых трактатов будет использован для работы, необходимой всем изучающим натурфилософию в рамках обычной учебной программы. Полное или определенные части более крупного Трактата будут предписаны в связи с добровольными экзаменами и упражнениями в Классе, а также для кандидатов на получение степени магистра с отличием. Учащиеся, желающие выполнять эти более важные задачи в классе, должны быть хорошо подготовлены по всем предметам старшего математического класса.

"Лаборатория, связанная с занятиями, открыта ежедневно с 9:00 до 16:00 для экспериментальных упражнений и исследований под руководством профессора и его официального ассистента".

В 1847 году собрания по экспериментальной физике были перенесены на 11 часов утра. Время проведения 9 часов утра по-прежнему (1908 г.) сохраняется для регулярных собраний обычного класса и 11 часов утра для собраний, проводимых два раза в неделю для упражнений и учебной работы, посещение которых необязательно.

[В настоящее время учрежден второй выпускной класс, который посещают очень многие. Каждый студент посещает три лекции и проводит четыре часа в лаборатории каждую неделю. Также проводится турнир более высокого класса в двух дивизионах.]

На заре своей профессорской карьеры Томсон призвал на помощь своих студентов для экспериментальных исследований. Во многих направлениях свойства материи все еще оставались неизученными, и было необходимо получить точные данные для совершенствования теорий упругости, электричества и теплоты, которые были основаны на исследованиях первой половины девятнадцатого века. Для авторов этих теорий — Гаусса, Грина, Коши и других — он был подходящим преемником. Не зная всего, что было сделано этими гениальными людьми, он заново изобрел, как мы видели, некоторые из их великих теорем, а в несколько более поздних работах, особенно по электричеству и магнетизму, поставил теории на новую основу, очищенную от всего постороннего и ненужного, и сократил гипотезы и допущения до минимально возможного числа, изложенных с самыми тщательными предосторожностями от недопонимания. По мере того как эта работа постепенно завершалась, необходимость дальнейших экспериментов становилась все более и более очевидной. Соответственно, он основал в старом колледже на Хай-стрит то, что, как он справедливо утверждал, было первой физической лабораторией для студентов.¹⁵ Сначала был пристроен старый винный погреб в подвале, примыкающий к классу натурфилософии, который был ареной ранних исследований, которые должны были привести к созданию большей части лучших работ современности. К этому немного позже была пристроена Экзаменационная комната в Блэкстоуне, которая, будучи заброшенной и "оставленной без присмотра", была пристроена к винному погребу и предоставила место для растущего числа увлеченных работников, которые попали под влияние нового учителя и стремились быть связанными с его работой. О многих исследованиях, которые были проведены в этом скудном помещении старого колледжа, будет упомянуто ниже.



ВНУТРЕННИЙ ДВОР СТАРОГО КОЛЛЕДЖА
С кабинетами натурфилософии

[На изображении внутреннего двора Старого колледжа напротив окна на первом этаже справа от башни впереди выходят в смотровую комнату Блэкстоуна, которая составляла большую часть новой физической лаборатории. Окна над ними, на втором этаже, выходят в аппаратную кафедры естественной философии. Междубашенкой справа от картины и углом двора находятся

окна класса натурфилософии. Чердак над аппаратной в более позднее время занимал инженерный факультет под руководством профессора Маккуорна Рэнкина.]

Здесь мы снова можем процитировать бангорский адрес:

"Вскоре после того, как я занял свою нынешнюю кафедру в Университете Глазго в 1846 году, мне довелось провести некоторые исследования электродинамических свойств вещества, чтобы ответить на вопросы, вытекающие из результатов математической теории, вопросы, ответы на которые можно было получить только прямым экспериментом. Работа по наблюдению оказалась слишком тяжелой, большая ее часть едва ли могла выполняться без совместной работы двух или более человек. Поэтому я пригласил студентов помочь в работе. Они охотно приняли приглашение и оказали мне самую веселую и умелую помощь. Вскоре после этого другие студенты, услышав, что их однокурсникам предстоит экспериментальная работа, пришли ко мне и вызвались помочь в расследовании. Я не мог поручить им всю работу по конкретному исследованию, с которого я начал, — "электрической конвекции тепла" — из-за нехватки средств, времени и возможностей организации, но я сделал все, что было в моих силах, чтобы найти для них работу по смежным предметам (электродинамические свойства металлов, модули упругости металлов, упругая усталость, атмосферное электричество и т.д.). Тогда у меня был обычный класс из ста студентов, некоторые из которых посещали лекции по натурфилософии по два часа в день, и им больше нечего было делать с утра до ночи. Это были безмятежные дни натурфилософии в Университете Глазго - дни, предшествовавшие вступлению в должность. Но у большинства учеников действительно была очень тяжелая работа, и многие из них работали после уроков, чтобы прокормиться. Некоторые были заняты преподаванием, некоторые были городскими миссионерами, намеревавшимися перейти в Основанную Шотландскую церковь или какую-нибудь другую религиозную деноминацию Шотландии, или в какую-нибудь из деноминаций Уэльса, потому что у меня всегда было много студентов-валлийцев. В те дни, как и сейчас, в шотландских университетах все будущие студенты-богословы изучали "философский учебный план" — "zuerst collegium logicum", затем моральную философию и (как правило, последней) натурфилософию. Три четверти моих добровольцев-экспериментаторов раньше были студентами, которые поступили на занятия по теологии сразу после завершения философской учебной программы. Я хорошо помню удивление великого немецкого профессора, когда он услышал об этом правиле и употреблении: "Что? теологи изучают физику?" Я сказал: "Да, они все это делают; и многие из них провели капитальные эксперименты. Я полагаю, они не считают, что их теология вообще страдает от того, что (они) узнали что-то о математике, динамике и экспериментальной физике, прежде чем приступить к ней".

Это утверждение, помимо того, что проливает интересный свет на условия университетской работы шестьдесят лет назад, иллюстрирует широкое толкование в Шотландии термина *Искусство*. Здесь это означало, поскольку кафедра естественной философии была основана в 1577 году и удерживалась одним из регентов университета, *Искусство либералов* в самом широком смысле, то есть изучение *гуманитарной* литературы (включая философию разума и морали) и физико-математических наук. В то время все это считалось необходимым для получения гуманитарного образования: в век науки, в который мы живем, как никогда важно, чтобы ни то, ни другое не было исключено из учебных программ по искусству в наших университетах. Общепринятое различие между искусством и наукой является ложным и продуктом узкой идеи, которая чужда традициям наших северных университетов.

Следует, однако, отметить, что основанная таким образом лаборатория была, по сути, исследовательской лабораторией; она не была предназначена для систематического обучения студентов методам проведения экспериментов. Лаборатории для этой цели появились позже, и как естественное следствие. Но для лучших студентов, плохо подготовленных, как, несомненно, некоторые из них были подготовлены к исследовательской работе, опыт, полученный в такой лаборатории, был очень ценным. Они узнали — и, действительно, должны были узнать — случайным образом, как определять физические константы, такие как удельный вес, теплоемкость, электрическое сопротивление и так далее. Ибо, кроме *Отношений опыта* Реньо и магнитных и электрических работ Гаусса и Вебера, не было никакого систематизированного массива информации, доступной для руководства студентами. Хорошие студенты могли отклоняться от основного направления исследования, чтобы приобрести навыки во вспомогательных определениях такого рода; для более легко обескураживаемого студента такие трудности оказывались непреодолимыми, а часто и абсолютно отпугивающими.

Физику наших дней нелегко осознать уровень знаний того времени, и поэтому он часто не осознает всей важности работы Томсона. Недостаток точного знания физических констант был в значительной степени следствием отсутствия точных определений величин, которые необходимо было определить, и в гораздо большей степени отсутствия какой-либо системы единиц измерения. Изучение явлений было в основном чисто качественным; там, где предпринималась попытка получить количественные определения, используемые единицы были произвольными и зависели от аппаратуры, имевшейся в распоряжении экспериментатора, и поэтому недоступны другим. В области теплотехники, как уже было сказано, великое начало было положено Реньо, в руках которого точное определение физических констант превратилось в тонкое искусство.

В электричестве и магнетизме уже существовали зачатки количественных измерений. Но лишь много времени спустя, когда действие магнитов и электрических токов было изучено гораздо глубже, Британская ассоциация приступила к своей великой работе по созданию системы абсолютных единиц для измерения таких воздействий. До тех пор сопротивление, например, куска проволоки прохождению по ней электрического тока выражалось каким-либо таким определением, что оно было равно сопротивлению определенного куска медной проволоки, имевшегося в распоряжении экспериментатора. Следовательно, экспериментаторам в других местах было практически невозможно извлечь выгоду из полученной информации. То же самое было и в других случаях. Здесь можно привести пример из работ Томсона по "Динамической теории теплоты", хотя он относится к тому времени (1851 г.), когда был достигнут некоторый прогресс в получении системы абсолютных единиц измерения. В § 118 (статья XLVIII) он заявляет, что электродвижущая сила термоэлектрической пары меди и висмута при температурах 0°C и 100°C . ее функции можно было бы оценить из проведенного Пуье сравнения силы тока, посылаемого этой электродвижущей силой по медному проводу длиной 20 метров и диаметром 1 миллиметр, с силой тока, разлагающего воду с определенной скоростью, если бы не было обнаружено, что удельные сопротивления различных образцов меди значительно отличаются друг от друга. Следовательно, хотя и сделана оценка, утверждается, что без экспериментов с реальной проволокой, используемой Пуье, было невозможно получить точный результат. Теперь, если бы в силах Пуье было точно определить сопротивление своей цепи в абсолютных единицах, в этом вопросе не возникло бы никаких трудностей, и его результат был бы немедленно доступен для требуемой оценки.

Когда начали изготавливать и прокладывать подводные кабели, все это пришлось менять. Потому что они были дорогими; атлантический кабель, например, стоил полмиллиона фунтов стерлингов. Состояние кабеля должно было проверяться через короткие промежутки времени в процессе изготовления; аналогичные часы должны были находиться на нем в процессе прокладки, а затем в течение всего срока его телеграфного использования. Поэтому наблюдения, сделанные одним наблюдателем, должны были быть доступны всем, с тем чтобы с помощью других приборов и в другом месте можно было провести эквивалентные наблюдения и количественно сравнить их результаты с результатами первого. Создание системы измерений для подобных целей потребовало большого теоретического обсуждения и огромного объема экспериментальных исследований. Это было предпринято специальным комитетом Ассоциации, и главную роль в обсуждении теории и в разработке экспериментальных методов сыграл Томсон. Расследования комитета проводились в несколько более поздний период карьеры Томсона, чем тот, с которым мы здесь имеем дело, и некоторый отчет о них будет дан в более поздней главе; но большая работа, подготовительная к определению электрических стандартов и приведшая к ним, была проделана добровольческим лабораторным корпусом в переоборудованном винном погребе старого колледжа.

Выбор и внедрение стандартов в области электротехники были работой необычайной важности для мира со всех точек зрения — политической, коммерческой и социальной. Это не только сделало возможным применение электричества в искусстве и промышленности, но и, освободив результаты экспериментов от расплывчатости использовавшихся ранее спецификаций, сделало дальнейший прогресс чистой науки об электричестве таким делом, в котором каждый шаг вперед, сделанный отдельным работником, способствовал прогрессу всех. Но, как и другие трудоемкие услуги, природа которых не ясна широкой публике, она никогда не получала должного признания от тех, кто извлек из нее выгоду. Если бы Томсон не проделал ничего большего, чем та работа, которую он проделал в этой связи, сначала со своими студентами, а затем с Комитетом Британской ассоциации, он был бы достоин уважения своих соотечественников.

Когда профессор Томсон приступал к исполнению обязанностей заведующего кафедрой и призывал своих студентов к себе на помощь, открытия Фарадея об индукции токов движением магнитов вблизи замкнутых проволочных цепей, или, что то же самое, о движении таких цепей в "полях" магнитов, не так давно были известны миру, и натурфилософы глубоко обдумывали их. Настало время для количественного исследования индукции тока, подобного тому, которое было проведено гениальным Ампером после открытия Эрстедом отклонения магнита электрическим током. Такому исследованию чрезвычайно способствовала концепция Фарадея о силовых магнитных линиях, перерезание которых проводом цепи приводило к возникновению индуцированного тока. Действительно, задействованные математические идеи были обозначены, и не туманно, самим Фарадеем. Но для того, чтобы сделать математическую теорию явной, а также исследовать и проверить ее следствия, требовался высочайший гений. Эта работа была в значительной степени выполнена Томсоном, чье изложение электродинамической теории помогло Максвеллу прийти к мнению, что свет является результатом распространения электрических и магнитных колебаний в изолирующей среде, светоносном эфире.

Другое исследование, к которому он уже приступил в 1847 году, имело огромное значение не только для чистой науки, но и для развития и надлежащей экономии всех промышленных

операций. Основы, на которых должна была быть построена динамическая теория теплоты, были частично заложены Карно и дополнялись экспериментально Джеймсом Прескоттом Джоулем, с которым Томсон познакомился в 1847 году на собрании Британской ассоциации в Оксфорде. Встреча в Оксфорде в 1860 году запомнилась широкой публике, главным образом из-за дискуссии, которая состоялась по теории Дарвина, и знаменитой диалектической встречи между епископом Уилберфорсом и профессором Хаксли; Оксфордская встреча 1894 года всегда будет ассоциироваться с объявлением об открытии аргона лордом Рэлеем и сэром Уильямом Рамзи: встреча 1847 года может запомниться не менее достойно, чем та, на которой Джоуль с числовой точностью сформулировал первый закон термодинамики. Джоуль представил свои экспериментальные результаты Математической и физической секции на этом собрании; и представляется вероятным, что они получили бы мало внимания, если бы Томсон не убедительно указал на их важность. С тех пор между двумя молодыми физиками часто происходили переписки, и вскоре началось сотрудничество, имеющее большое значение для науки, и дружба, которая продолжалась до смерти Джоуля в 1884 году. [См. стр. 88 ниже.]

Следующие несколько глав мы посвятим изложению, насколько это возможно, без формальностей, этих важных разделов ранней оригинальной работы Томсона в качестве профессора в Глазго.

ГЛАВА VI

ДРУЖБА Со СТОКСОМ И ДЖОУЛЕМ. РАННЯЯ РАБОТА В ГЛАЗГО

Во время своего пребывания в Кембридже Томсон подружился с Джорджем Гэбриэлом Стоксом, который получил диплом старшего рэнглера и первого призера Smith's Prize в 1841 году. Они вместе обсуждали математические вопросы и публиковали статьи на различные темы в *Cambridge Mathematical Journal*. В 1846 году "Кембридж и Дублин" было заменено на "Кембридж" в названии журнала, и была начата новая серия под редакцией Томсона. Особенностью предыдущих томов нового выпуска была серия заметок по гидродинамике, написанных по соглашению между Томсоном и Стоксом и напечатанных в томах. ii, iii и v. Первая, вторая и пятая части серии были написаны Томсоном, остальные - Стоксом. Содержание этих Заметок было не совсем новым, но многие моменты были представлены в новом, более реалистичном свете, и серия, без сомнения, оказала большую услугу студентам, для использования которых предназначались статьи. Некоторый отчет об этих заметках будет дан в более поздней главе, посвященной работам Томсона по гидродинамике.

Математическая мощь и верный физический инстинкт Стокса всегда вызывали у Томсона величайшее восхищение. Когда однажды его спросили, кто был самым выдающимся работником в области физической науки на континенте, он ответил: "Я не знаю, но кто бы это ни был, я уверен, что Стоукс ему под стать". В отчете о выступлении, с которым он выступил в июне 1897 года на праздновании юбилея сэра Джорджа Стокса в качестве профессора математики лукасианской школы, лорд Кельвин упомянул об их раннем общении в Кембридже в следующих выражениях: "Когда он размышлял о своих ранних успехах, он вспомнил огромную доброту, проявленную к нему, и огромную ценность, которую его общение с сэром Джорджем Стоуксом был рядом всю жизнь. Всякий раз, когда возникала математическая трудность, он обычно

говорил себе: "Спроси Стокса, что он об этом думает". Он получал ответ, если ответ был возможен; ему говорили, во всяком случае, если на него нельзя было ответить. Он чувствовал это еще в студенческие годы, и сейчас он чувствует это еще сильнее".

После смерти Стокса в феврале 1902 года лорд Кельвин снова упомянул об этих ранних дискуссиях в восторженной дани уважения в журнале *Nature* от 12 февраля. Научная работа Стокса и научная мысль лишь частично представлены его опубликованными трудами. Он щедро и безвозмездно раздавал свои сокровища всем, кому посчастливилось иметь возможность получать от него. Он учил меня принципам солнечной и звездной химии, когда мы прогуливались по колледжам незадолго до 1852 года (когда я отказался от своей стипендии в Питерхаусе, чтобы больше не бывать в Кембридже в течение многих лет), - это лишь один пример".

Обмен идеями между Стоксом и Томсоном, начавшийся в те далекие дни, продолжался постоянно и, по-видимому, стимулировал обоих. Эти двое мужчин в некотором смысле дополняли друг друга по характеру и темпераменту. Оба обладали огромной силой и проницательностью, но в то время как Стоукс был одинаково спокоен, вдумчив и рассудителен, энтузиазм Томсона был более откровенно пылким, и он был склонен временами проявлять неистовство и порывистость в своем стремлении продолжить расследование; и хотя, как и подобало его национальности, он был осторожен в своих выводах, он проявлял, возможно, меньше сдержанности, представляя свои результаты научной общественности.

Здесь можно привести характерный пример неистового стремления Томсона к экспериментальным результатам, хотя инциденты произошли на гораздо более позднем этапе его карьеры, чем тот, который нас сейчас интересует. В 1880 году его внимание привлекло изобретение вторичной батареи Фора. М. Фор привез из Парижа несколько готовых к зарядке элементов и продемонстрировал в Физической лаборатории в Глазго очень мощные токи, которые из-за их очень низкого внутреннего сопротивления они были способны производить в толстом куске медной проволоки. Ячейки были оригинальной формы, сконструированные путем покрытия полосок листового свинца с обеих сторон пастой из сурика, смоченной разбавленной серной кислотой, обмотки их шерстяной тканью, сшитой вокруг них, а затем скатывания двух пластин вместе, чтобы сформировать пару пластин для одной ячейки.

Сразу же был получен запас листового свинца, сурика и шерстяной ткани, и весь лабораторный корпус из студентов и сотрудников приступил к работе по изготовлению вторичных аккумуляторов. Для зарядки аккумуляторов была запрошена небольшая динамо-машина Siemens-Halske, а для привода динамо-машины в ночное время была реквизирована вентиляционная паровая машина Университета. Таким образом, университетские кочегары и инженер были переведены на двойную смену; аккумуляторы заряжались ночью, а зарядный ток и потенциал батареи измерялись через определенные промежутки времени.

Затем клетки прогоняли в течение дня и таким же образом измеряли их выработку. Как раз в тот момент, когда это началось, Томсон слег с болезнью, которая приковала его к постели на пару недель или около того; но это не привело к прекращению лабораторной деятельности. Напротив, лабораторный корпус был разделен на два отделения, одно на ночь, другое на день, и работа по зарядке и разрядке, а также по измерению расхода и отдаче энергии продолжалась без перерыва. Результаты, полученные в течение дня, были переданы вечером Томсону, а ранним утром он был готов просмотреть те, что были получены ночью, и предложить

дальнейшие вопросы, на которые следовало ответить без промедления. Такой режим работы не мог продолжаться бесконечно, но он продолжался до тех пор, пока его помощники (некоторым из которых приходилось работать в обе смены!), не говоря уже о кочегарах и студентах, не были изрядно измотаны.

В других случаях, когда его не было дома, почта доставляла его указания сотрудникам лаборатории слишком медленно, и он изо дня в день посылал телеграммы с вопросами и инструкциями, касающимися текущей работы. Таким образом, один важный результат (предвосхищенный, однако, Виллари) серии исследований влияния напряжения на намагничивание, который составляет часть VII его работы "*Электродинамические свойства металлов*" — тот факт, что до определенной силы намагничивания воздействие натяжения, приложенного к проволоке из мягкого железа, увеличивает производимую намагниченность, а при более высоких силах намагничивания уменьшает ее, — был передан ему по телеграфу в тот вечер, когда статья была зачитана Королевскому обществу.

Таким образом, будет видно, что Томсон, независимо от того, находился ли он в своей комнате или в отпуске, был сосредоточен на своей научной или практической работе и почти с нетерпением ждал ее прогресса. Стоукс работал в основном сам; но даже если бы у него был целый отряд рабочих и ассистентов, маловероятно, что произошли бы такие нарушения графика посещения занятий и распорядка лаборатории и мастерской, которые нередко происходили в Глазго, когда работа Томсона была в шестидесятых и семидесятых годах в самом разгаре.

Стоукс и Томсон последовательно были президентами Королевского общества: Стоукс с 1885 по 1890 год, а Томсон (с 1892 года как лорд Кельвин) с 1890 по 1895 год. Это высшее отличие, которого может достичь любой ученый в этой стране, и очень примечательно, что в последнее время сменилось два президента подряд, чьи образ мыслей и математические способности столь непосредственно сопоставимы с образами великого основателя современной естественной философии. Стоукс обладал дополнительным отличием в том, что был прямым преемником Ньютона в качестве лукасианского профессора математики в Кембридже. Но Томсону предстояло многое сделать, опубликовав "*Натурфилософию*" Томсона и Тейта, чтобы вернуть течение учения и мысли в динамической науке к идеям *Principia* показать, насколько полно фундаментальные законы, изложенные в этом великом классике, помогают включить современную теорию энергии во всех ее преобразованиях в категорию динамического взаимодействия между материальными системами.

Один чрезвычайно выдающийся политик, ныне покойный, сказал несколько лет назад, что нынешнему веку исключительно не хватает умов высшего качества. Что касается научного гения, то это изречение было на редкость ложным: здесь мы имеем поразительное доказательство обратного. Но мало кто из политиков что-либо знает о науке; более того, некоторые из тех, кто руководит или стремится руководить судьбами самой научной и промышленной империи, которую когда-либо видел мир, почти хвастаются своим невежеством. Конечно, есть достойные исключения.

Здесь удобно сослаться на вклад Стокса и Томсона в физическое объяснение темных линий солнечного спектра и на их предсказание возможности определения строения звезд и земных веществ с помощью того, что сейчас известно как спектральный анализ. Томсон обычно излагал физическую теорию этих линий в своих лекциях и говорил, что идею он почерпнул у

Стокса в разговоре, который они вели в саду Пембрук в Кембридже "незадолго до 1852 года" (см. Цитату из его статьи о *природе*, процитированной выше, стр. 80, и *Балтиморских лекциях*, стр. 101). Это подтверждается студенческой записной книжкой 1854 года, которая сейчас находится на кафедре естественной философии. Изложенные в нем утверждения совершенно определены и ясны и показывают, что в то раннее время все дело спектрального анализа находилось в его руках и требовало подтверждения только экспериментами по изменению линий земных веществ атмосферой вещества, которое производило линии, и сравнением положений ярких линий земных веществ с позициями темных линий солнечного спектра. Трудно сказать, почему Томсон не провел все эти эксперименты. Некоторые из них он действительно сделал, поскольку профессор Джон Фергюсон, изучавший натурфилософию в 1859-60 годах, недавно рассказал, как он был свидетелем того, как Томсон проводил эксперимент по изменению линий натрия, пропуская свет от соленого пламени спиртовки через пары натрия, образующиеся при нагревании металла в железной ложке. Несколько дней спустя, говорит профессор Фергюсон, Томсон зачитал письмо своему классу, в котором сообщил об открытии Бунзена и Кирхгофа.

Письмо Стокса сэру Джону Лаббоку, напечатанное в *Научной переписке сэра Джорджа Гэбриэля Стокса*, излагает его воспоминания по этому поводу и ставит Томсону в заслугу то, что он вывел метод спектрального анализа, метод, на который сам Стоукс не претендует. Он говорит: "Думаю, я знаю, на что намекал сэр Уильям Томсон. Я хорошо знал то, что было общеизвестно и упомянуто Гершелем в его "трактате о свете", что яркий свет, наблюдаемый в пламени, возникает специально при добавлении содовой соли. Я связал это в своем сознании с присутствием натрия, и я полагаю, что другие сделали то же самое. Совпадение в расположении яркой и темной буквы D слишком поразительно, чтобы мы могли считать его случайным. В разговоре с Томсоном я объяснил связь темной и светлой линий по аналогии с набором фортепианных струн, настроенных на одну и ту же ноту, которые, если бы по ним ударили, выдали бы эту ноту, а также были бы готовы ее озвучить, фактически подхватить, если бы она прозвучала в воздухе. Это подразумевало бы поглощение воздушных вибраций, так как в противном случае происходило бы выделение энергии. Соответственно, я объяснил присутствие темного D в солнечном спектре, предположив, что в атмосфере присутствует натрий, способный поглощать свет с такой особой преломляемостью. Он спросил меня, были ли какие-либо другие случаи подобного совпадения светлых и темных линий, и я сказал, что, по моему, один из них упоминался Брюстером. Он был сильно поражен этим и поспешил с выводом, что для выяснения того, какие вещества содержатся в звездах, мы должны сравнить положение темных линий, видимых в их спектрах, со спектрами металлов и т.д.

"Я должен был бы сказать, что, по моему мнению, Томсон забегает слишком далеко вперед, поскольку в то время я полагал, что, хотя несколько темных линий можно отнести к элементарным веществам, натрий для одного и, вероятно, калий для другого, тем не менее, большая их часть, вероятно, образована парами соединений, которые, подобно перекиси азота и некоторым другим известным сложным газам, обладают свойством избирательного поглощения".

Следует помнить, что экспериментальное обоснование метода спектрального анализа было опубликовано в конце 1859 года Бунзеном и Кирхгофом, которым, следовательно, следует отдать всю должную как первооткрывателям.

Лорд Кельвин в последние годы своей жизни часто рассказывал историю о своей первой встрече с Джоулем в Оксфорде и об их второй встрече две недели спустя в Швейцарии. Он сделал это также в своей речи, произнесенной по случаю открытия статуи Джоуля в ратуше Манчестера 7 декабря 1893 года, и мы цитируем это повествование из-за его научного и личного интереса. "Я никогда не смогу забыть Британскую ассоциацию в Оксфорде в 1847 году, когда в одной из секций я услышал доклад, прочитанный очень скромным молодым человеком, который своим поведением не выдавал, что у него есть отличная идея, которую нужно реализовать. Эта статья произвела на меня огромное впечатление. Сначала я подумал, что это не может быть правдой, потому что это отличалось от теории Карно, и сразу после прочтения статьи я перекинулся несколькими словами с автором, Джеймсом Джоулем, что положило начало нашему сорокалетнему знакомству и дружбе. Вечером того же дня это очень ценное учреждение Британской ассоциации, *its conversazione*, предоставило нам возможность для часовой беседы и обсуждения всего, что каждый из нас знал о термодинамике. У меня появились идеи, которые раньше никогда не приходили мне в голову, и я подумал, что тоже предложил нечто достойное внимания Джоуля, когда рассказал ему о теории Карно. Тогда и там, в библиотеке Рэдклиффа в Оксфорде, мы расстались, оба, я уверен, чувствуя, что нам есть что сказать друг другу и есть над чем поразмыслить в том, что мы обсуждали в тот вечер. Но ... две недели спустя, прогуливаясь по долине Шамуни, я увидел вдалеке молодого человека, идущего по дороге мне навстречу и несущего в руке что-то похожее на палку, но он не использовал это ни как альпеншток, ни как трость для ходьбы. Это был Джоуль с длинным термометром в руке, которому он не доверял сам по себе *вшарабанке*, медленно поднимавшийся за ним на холм, чтобы тот не разбился. Но там, удобно и безопасно сидя в *автобусе*, была его невеста — отзывчивая спутница и участница его многолетней работы. Он не сказал мне ни в разделе А, ни в библиотеке Рэдклиффа, что собирается жениться через три дня, но теперь, в долине Шамуни, он представил меня своей молодой жене. Мы договорились встретиться снова через две недели в Мартиньи, чтобы провести эксперименты с теплом водопада (Салланш) с помощью этого термометра; и впоследствии мы встречались снова и снова, и с тех пор действительно оставались близкими друзьями до конца жизни Джоуля. В течение многих лет, начиная всего лишь сорок лет назад, я испытывал огромное удовольствие от проведения экспериментов вместе с Джоулем, которые привели к некоторым важным результатам в отношении теории термодинамики. Это одно из самых ценных воспоминаний в моей жизни, и действительно, настолько ценное воспоминание, насколько я могу себе представить, есть у любого человека, интересующегося наукой".

В начале каждого сеанса своего курса лекций профессор Томсон читал, или, скорее, пытался читать, вводную речь о масштабах и методах физической науки, которую он подготовил для своего первого сеанса в 1846 году. В нем излагался тот факт, что в науке было две стадии прогресса — естественноисторическая стадия и натурфилософская стадия. В первом случае первооткрыватель или учитель занят сбором фактов и распределением их по классам в соответствии с их природой; во втором он занимается взаимосвязями уже открытых и классифицированных фактов и пытается подвести их под рамки общих принципов или причин. Как только философская стадия достигнута, ее методы и результаты соединяются и расширяются путем продолжения исследования фактов, контролируемых и направляемых выводами общей теории. Таким образом, метод сначала является чисто индуктивным, но на второй стадии становится как индуктивным, так и дедуктивным; общая теория предсказывает посредством своих выводов, и проверка их экспериментом и наблюдением придает теории

достоверность, которую не могла бы обеспечить простая индукция. Эти этапы научного исследования хорошо иллюстрируются законами Кеплера, к которым он пришел путем простого сравнения движений планет и дедукции этих законов с замечательной поправкой к третьему закону, данной теорией всемирного тяготения. Предсказание существования и места планеты Нептун по возмущениям Урана является прекрасным примером предсказательного качества истинной философской теории.

Затем лекция перешла к изложению области динамики, определению различных ее частей и подчеркиванию важности кинематики, которая была описана как чисто геометрический предмет, геометрия движения, соображения, исходя из которых, рассматриваются в каждой динамической проблеме. Это различие между динамическими и кинематическими соображениями — между теми, в которых задействована сила, и теми, в которые входит только идея перемещения в пространстве и во времени, — подчеркивается в *Натурфилософии* Томсона и Тейта, которая начинается с длинной главы, полностью посвященной кинематике.

Неизвестно, прочитал ли профессор Томсон всю Вводную лекцию в первый раз — клерк Максвелл, как говорят, утверждал, что она была строго выдержана только в тот единственный раз и была закончена гораздо быстрее, чем отведенный на нее час. В последующие годы он никогда не читал больше пары страниц, когда какая-нибудь новая иллюстрация или новый научный факт, имевший отношение к его предмету, заставляли его отвлекаться от рукописи, к которой почти никогда не возвращались, и через несколько минут она механически откладывалась в сторону и забывалась. Как только началось занятие, он с юмором сообщил собравшемуся классу, что, по его мнению, ему никогда раньше не удавалось дочитать лекцию до конца, и добавил, что он решил, что они должны прослушать ее полностью! Но снова произошло неизбежное отступление, из-за поглощенности профессора новой темой обещание было забыто, и написанная лекция прошла по-прежнему! Эти отступления были чрезвычайно интересны лучшим ученикам: компенсировали ли они недостаток тщательно подготовленного изложения элементов предмета, соответствующего потребностям большинства членов класса, — это вопрос, который здесь нет необходимости обсуждать. На протяжении всех его элементарных лекций — вводных или нет — постоянно возникали новые идеи и проблемы. Один выдающийся физик однажды заметил, что Томсон был, пожалуй, единственным из ныне живущих людей, который совершал открытия во время чтения лекций. Вряд ли это было правдой; в пылу действия и напряжении самовыражения ум каждого интенсивно мыслящего человека часто видит новые отношения и находит новые точки зрения, которые равносильны открытиям. Но плодovitость ума, конечно, имеет свои недостатки: неожиданное не может произойти, не отвлекая всех заинтересованных сторон. Разум, способный увидеть теорию физической вселенной в виде дымового кольца, скорее всего, если его не держать в экстраординарных и сдерживающих условиях, поддастся искушению отвлечься от того, что является строго рассматриваемым предметом, к миру материй, которые этот предмет предполагает. Следует признать, что профессор Томсон был слишком рассуждающим для обычного студента и, возможно, не изучал искусство сводить физические теории к наиболее легко усваиваемой форме. Его живость ума и широта кругозора придавали его лекциям особую ценность для продвинутых студентов, так что это было компенсирующим преимуществом.

Преподаватель натурфилософии действительно оказывается в чрезвычайно трудном положении. Ткань природы соткана без швов, и разбирать ее на куски — значит в некотором роде разрушать. После детального изучения его необходимо реконструировать и рассматривать как

единое целое, иначе его смысл ускользает от нас. И здесь кроется трудность: каждая частица материи находится в отношении ко всему остальному, и необходимо учитывать обе стороны каждого отношения. Другими словами, при объяснении любого одного явления в большей или меньшей степени задействовано объяснение всех остальных. Это не означает, что исследование или изложение невозможно, или что мы не можем продвигаться шаг за шагом; но это показывает глупость той критики науки и научного метода, которая требует полного или предельного знания, и популярного требования простой формы слов для выражения того, что в действительности бесконечно сложно.

В первые годы своей профессорской деятельности профессор Томсон полностью сам преподавал в своем классе и собрал вокруг себя, как он сказал нам в Бангорском обращении, группу увлеченных работников, которые помогали ему в исследованиях электродинамических свойств металлов, упругих свойств веществ, теплопроводности и электропроводности металлов, а позднее в электрических и магнитных исследованиях, которые он проводил в качестве члена Комитета Британской ассоциации по электрическим стандартам. Класс собирался, как уже было сказано, два раза в день, сначала для лекций, затем для упражнений и устного экзамена. Изменения, которые произошли позже в учебной программе, и особенно введение классов с отличием по различным предметам, затруднили, если не сделали невозможным, ежедневное двухчасовое посещение всех предметов, и учащимся сначала разрешалось посещать второй час, и, в конце концов, такое посещение стало практически необязательным. Но до тех пор, пока сохранялась старая традиционная учебная программа по искусствам — гуманизму, греческому языку, логике, математике, моральной философии и натурфилософии, — большое количество студентов сочли выгодным посещать занятия в оба часа, и было возможно дать большое количество превосходных учебных пособий с помощью работы с примерами и устного экзамена.

Томсон всегда считал, что в его компетенцию входит предмет физической астрономии, и хотя его лекции по этому предмету, как правило, ограничивались изложением законов Кеплера и выводов Ньютона из них, он позаботился о том, чтобы письменные и устные экзамены включали астрономические вопросы, к которым студентам было предписано подготовиться, прочитав *Наброски* Гершеля или какой-нибудь подобный учебник. Это предписание нередко игнорировалось, и замешательство студента следовало как нечто само собой разумеющееся, если его требовали отвечать. Не всегда к вопросам было легко подготовиться с помощью чтения. Человек может обладать достаточными знаниями в области элементарной астрономии и быть неспособным сразу ответить на такой вопрос, как "Почему эклиптика называется эклиптикой?", или сказать коротко и сжато, когда лекции о Кеплере были пропущены, какой вывод сделал Ньютон из третьего закона движения планет.

Домашние упражнения не были предписаны как часть обычной работы, за исключением времени от времени занятий в "Высшем математическом классе", который в течение тридцати или более лет пребывания Томсона на этом посту проводился на кафедре. Но весь обычный класс собирался каждое утро понедельника и проводил обычный лекционный час, отвечая на доклад с динамическими и физическими вопросами. В этих статьях было задано до десяти, а иногда и одиннадцать вопросов, некоторые из них были довольно сложными и включали в себя новые идеи, и этот еженедельный сборник задач помог лучшим студентам, возможно, дюжине или больше, приобрести способность к быстрому и краткому изложению. Не было ничего необычного в том, что хороший человек набирал 80, 90 или даже 100 процентов. в газете

говорилось, что за один час можно совершить немалый подвиг. Но для значительного большинства класса сомнительно, чтобы еженедельный экзамен принес большую пользу: возможно, они попытались ответить на один или два более наглядных вопроса, но многие практически ничего не сделали. Экзамены проводились каждую неделю, и поэтому подготовкой к одному за другим пренебрегали, и в результате работа затягивалась так сильно, как это было бы, если бы на сессию было предписано всего четыре или пять работ. Тогда работа по просмотру такого количества работ была тяжелой задачей для ассистента профессора, задачей, которая стала невыполнимой, когда в течение нескольких лет в начале восьмидесятых студентов в обычном классе насчитывалось около 250 человек.

Предмет натурфилософии стал настолько обширным в 1846 году, что профессор Дж. П. Никол обратил внимание на необходимость специальных мер для его адекватного преподавания. Что бы он сказал, если бы мог оценить его размеры в настоящее время! Дать даже краткий обзор основных тем динамики, теплоты, акустики, света, магнетизма и электричества - это больше, чем может быть достигнуто в любом курсе университетских лекций; и единственный способ хорошо и экономично обучать большое количество студентов¹⁶, которые сейчас заполняют классы физики, - это читать каждую неделю, скажем, три лекции, как можно более тщательно продуманные и организованные, без каких-либо перерывов со стороны других студентов. устный экзамен и собирайте студентов небольшими классами два или три раза в неделю для выполнения упражнений и устного экзамена.

Томсон изложил свои взгляды относительно экзаменов и лекций в бангорском обращении. "Целью университета является преподавание, а не тестирование ... что касается преподавания в университете, то целью экзамена является продвижение преподавания. Экзамен должен быть, в первую очередь, ежедневным. Ни один профессор не должен встречаться со своим классом, не поговорив с ними. Он должен разговаривать с ними, а они с ним. Французы называют лекцию *конференцией*, и я восхищаюсь этой идеей. Каждая лекция должна быть конференцией преподавателей и студентов. Это истинный идеал профессорской лекции. Я обнаружил, что многие студенты, поступающие в колледж, страдают болезнью под названием "афазия". Они не отвечают, когда их спрашивают, даже когда сами слова ответа вкладываются в их уста, или когда ответ просто "да" или "нет". Эта болезнь проходит через несколько недель, но великое лекарство от нее заключается в повторном, осторожном и очень свободном обмене вопросами и ответами между преподавателем и студентом.... Письменные экзамены очень важны, поскольку учат студента выражать ясностью и точностью полученные им знания, но они должны проводиться раз в неделю, чтобы приносить пользу".

Большая трудность сейчас, когда и классы, и предмет значительно расширились, состоит в том, чтобы вести свободную беседу между профессором и студентом и в то же время давать адекватный отчет о предмете. Тщательный устный экзамен двух студентов в течение каждого аудиторного часа - это примерно то, что можно сделать, если вообще требуется какое-либо систематическое изложение в виде лекции; и, таким образом, конференция между преподавателем и отдельным студентом может проводиться максимум два раза в год. Тем не менее лорд Кельвин, несомненно, был прав: устный экзамен и обучение отдельных студентов искусству ясного и готового выражения очень желательны. Настоящие трудности по этому предмету возникают у лучших студентов, и обсуждение их в присутствии других полезно для всех. В наши дни это трудно, поскольку большие классы не могут позволить себе ждать, пока два или три отстающих студента нащупывают ответы на вопросы — которые во многих случаях

должны касаться вопросов, достаточно простых для большинства, — не говоря уже о соблазне внести беспорядок, который демонстрация личных особенностей или странностей выражения обычно создает у группы студентов. Но время будет сэкономлено и добавится много преимуществ, если большие классы будут разделены на секции для учебной работы, чтобы дополнить тщательное изложение предмета в систематических лекциях, читаемых всему классу в каждом конкретном случае. Введение системы самоучителей, однако, принесет гораздо больше вреда, чем пользы, если только метод обучения не будет таким, чтобы способствовать самостоятельности студента, которого не нужно, так сказать, кормить с ложки: такой метод и преимущества еженедельного экзамена на бумаге могут быть обеспечены, если обучающий класс будет отрабатывать на месте упражнения, предписанные лектором. Но этой опасности, которая является вполне реальной, можно полностью избежать только благодаря мерам предосторожности умелого учителя, который на этих небольших занятиях будет вытягивать идеи своих учеников и направлять их, а не передавать знания напрямую.

Через несколько лет Томсон счел необходимым назначить помощника, и был выбран мистер Дональд Макфарлейн, который отличился на занятиях математикой и натурфилософией. Мистер Макфарлейн изначально был печатником и, по-видимому, был учеником в Александрии в долине Левен на момент принятия первого законопроекта о реформе. После некоторого времени, проведенного в хлопчатобумажной промышленности округа, он стал учителем всельской школе в долине Левен, а затем поступил студентом в университет. Он исполнял свои обязанности самым преданным и самоотверженным образом вплоть до своей отставки в 1880 году, когда он стал уже преклонных лет. Он отвечал за инструменты кафедры, готовил иллюстрации к лекции и присутствовал во время лекции, чтобы помочь в экспериментах и предоставить числовые данные, когда это требовалось, готовил еженедельные экзаменационные работы для класса и читал сданные ответы, а также помогал в оригинальных исследованиях, которыми профессор всегда с энтузиазмом занимался. Макфарлейн был своего рода универсальным физическим гением; опытным вычислителем и точным и тщательным экспериментатором. Он провел много долгих и сложных арифметических исследований, много приборов смастерил по-домашнему, многое починил и отрегулировал. Затем, всегда, когда профессор уходил с дороги и в аппаратной, если не в лаборатории, воцарялось спокойствие, Макфарлейн садился, чтобы уменьшить стопку экзаменационных работ, чтобы не наступил понедельник с новым потоком грубых ответов и странных ошибок, прежде чем исчезнет прежний. По пятницам, в 3 часа дня, он давал ответы на вопросы предыдущего понедельника всем членам класса, кто хотел присутствовать; и его четкие и обдуманно объясненные были высоко оценены. Студенты каждый год отдавали ему неизменную дань уважения и часто принимали форму ценного подарка, на который подписывались все без исключения. Он был по-своему отшельником, вряд ли кто-нибудь знал, где он живет - профессор, конечно, не знал, — и человеком высочайших способностей и абсолютного бескорыстия. Час вечером с одним или двумя близкими друзьями и изучение немецкого языка были единственными развлечениями в уединенной жизни Макфарлейна. Он был полон юмора и с большим удовольствием рассказывал истории о достойных университетских деятелях ушедшей эпохи. В течение тридцати лет он работал за мизерную зарплату, поскольку в течение более раннего периода времени в государственном гранте шотландским университетам не было предусмотрено никаких ассигнований на ассистентов. Постановлением, изданным в 1861 году Университетскими комиссарами, назначенными в соответствии с Законом 1858 года, из Консолидированного фонда была выделена стипендия в размере 100 фунтов стерлингов в год

для ассистента на каждом из факультетов гуманизма, греческого языка, математики и естественной философии, а также для двоих на химическом факультете; и положение Макфарлейна несколько улучшилось. Его почтение к Томсону было таким, какое мало кто из студентов или ассистентов испытывал к мастеру: его преданность напоминала преданность старого *фамулуса*, а не гораздо более сдержанное уважение, которое современные ассистенты проявляют к своим начальникам.

После выхода на пенсию Макфарлейн продолжал жить в Глазго и развлекался чтением непривычной латинской литературы и вычислением затмений! Наконец он вернулся в Александрию, где и умер в феврале 1897 года. "Старина Макфарлейн" будет храниться в теплых воспоминаниях до тех пор, пока студенты курса натурфилософии в пятидесятых, шестидесятых и семидесятых годах, а теперь, увы! быстро исчезающая группа, выживи.

Вскоре после получения степени бакалавра в Кембридже в 1845 году Томсон был избран членом Колледжа Святого Петра. В 1852 году он отказался от стипендии, женившись на мисс Маргарет Крам, дочери мистера Уолтера Крама из Торнлибанка, недалеко от Глазго, но был переизбран в 1871 году и с тех пор оставался членом Питерхауса на протяжении всей своей жизни.

ГЛАВА VII

"ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ТЕПЛА КАРНО" — ПЕРЕХОД К ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТЕПЛА

Встреча Томсона и Джоуля в Оксфорде в 1847 году принесла важные результаты в теорию тепла. Томсон ранее познакомился с эссе Карно, скорее всего, благодаря рассказу Клапейрона о нем в *Журнале политехнической школы* за 1834 год, и принял точку зрения Карно о том, что при выполнении работы тепловой машиной тепло просто передается от тела с одной температурой к телу с более низкой температурой. Джоуль, по-видимому, ничего не знал о теории Карно и поэтому подошел к рассмотрению этого вопроса без каких-либо предвзятых мнений. Таким образом, он пришел к четкому представлению о тепле как о чем-то, что может быть преобразовано в работу, *и наоборот*. Это была основная идея его попытки найти динамический эквивалент тепла. Было очевидно, что тепловой двигатель забирает тепло из источника и отдает его холодильнику, и Джоуль, естественно, пришел к выводу, что появление работы, выполняемой двигателем, должно сопровождаться исчезновением количества тепла, эквивалентного проделанной работе. Он последовательно проводил эту идею через все свои работы по преобразованию энергии, причем не только в тепловых двигателях, но и в том, что можно было бы назвать электрическими двигателями. Ибо он указал, что тепло, выделяемое в цепи гальванической батареи, эквивалентно изменениям энергии внутри батареи, и что, более того, когда электромагнитный двигатель приводится в действие током, или когда в вольтметре в цепи происходит электрохимическое разложение, тепло, выделяемое в цепи при данном расходе материалов батареи, было меньше, чем это было бы в противном случае, на эквивалент работы, выполняемой двигателем, или химических изменений, производимых в вольтметре. Таким образом, Джоуль раньше, чем Томсон, овладел фундаментальным понятием, на котором основана истинная динамическая теория тепловых двигателей. Томсон, с другой стороны, как

только он получил эту идею, смог добавить к ней концепцию, заимствованную у Карно, об обратимом двигателе как двигателе наибольшей эффективности, и в высшей степени оригинальным образом вывести все следствия из этих доктрин, которые составляют обычную термодинамику даже в настоящее время. Хотя Клаузиус был первым, как мы увидим, кто вывел различные важные теоремы, все же обсуждение этого вопроса Томсоном имело особое качество. Это было отмечено той свободой от невысказанных предположений, от посторонних соображений, от расплывчатости высказываний и мыслей, которая характеризует все его приложения математики к физике. Физические идеи всегда излагаются ясно и таким образом, что их количественное представление является непосредственным: у нас будет пример этого в учении об абсолютной температуре. В большинстве термодинамических дискуссий, которые берут за отправную точку великие мемуары Клаузиуса, предполагается, что температура задается гипотетическим чем-то, что называется совершенным газом, и очень трудно, если не невозможно, составить точное представление о свойствах такого газа и основанной на нем температурной шкале. Шкала Томсона позволяет определить идеальный газ, а также наблюдать и измерять отклонения свойств обычных газов от свойств такого газа.

Таким образом, идея, которую Джоуль изложил в разделе А, когда Томсон вмешался, чтобы привлечь внимание к ее важности, заключалась в том, что работа, затрачиваемая на преодоление трения, эквивалентна выделяемому теплу, что фактически количество выделяемого тепла в таком случае пропорционально затраченной работе, совершенно независимо от материалов, используемых в процессе, при условии, что не происходит изменения внутренней энергии любого из них, которое повлияло бы на результирующее количество тепла. Это навязало физикам точку зрения, на которую указывает доктрина нематериальности тепла, установленная экспериментами Румфорда и Дэви, что тепло само по себе является формой энергии; и, таким образом, принцип сохранения энергии был освобожден от своего единственного недостатка, его очевидной несостоятельности, когда работа выполнялась против трения.

Румфорд отметил очень большое выделение тепла при натирании оружейного металла тупым сверлом и пришел к разумному выводу, что то, что выделяется в явно неограниченном количестве при истирании или вырубке незначительного количества материалов, не может быть материальной субстанцией. Он также произвел приблизительную оценку соотношения между работой, затрачиваемой на приведение бурильного станка в действие с помощью лошадиных сил, и выделяемым теплом. Метод Джоуля определения рабочего эквивалента тепла был усовершенствован методом Румфорда, но отличался в том важнейшем отношении, что для измерения затрат труда и получения тепла использовались точные средства. Он размешивал жидкость, такую как вода или ртуть, в своего рода маслостойкой, приводимой в движение падающим грузом. Диапазон опускания груза позволял точно оценить затраченную работу, а чувствительный термометр в жидкости измерял повышение температуры; таким образом, выделяемое тепло было точно определено. Повышение температуры было очень незначительным, а изменение состояния жидкости, и, следовательно, любое возможное изменение ее внутренней энергии, было бесконечно малым. Эксперименты проводились с большой тщательностью и включали очень точные измерения различных поправок — например, количества работы, затрачиваемой на шкивы и шарниры без воздействия на жидкость, и потери тепла за счет излучения. Эксперименты доказали, что работа, затраченная на жидкость, и выделяемое тепло были прямо пропорциональны друг другу. Наконец, в 1850 году он обнаружил, что 772 фут-фунта работы в Манчестере вырабатывают одну британскую

тепловую единицу, то есть столько тепла, сколько достаточно для повышения температуры фунта воды с 60°F . до 61°F . Приближение к этому выводу содержалось в документе, который он направил Британской ассоциации в Оксфорде в 1847 году.

Результаты более позднего определения, сделанного с помощью усовершенствованного аппарата и завершено в 1878 году, дали лишь немного более высокий результат. При корректировке на соответствующий градус Фаренгейта на воздушном термометре он должен быть увеличен чуть менее чем на один процент. Точное соотношение было предметом в течение последних двадцати лет большой усовершенствованной экспериментальной работы, но без какого-либо серьезного изменения указанного выше числа.

Вероятно, что вследствие конференции, которую он провел с Джоулем в Оксфорде, мысли Томсона на некоторое время обратились почти исключительно к динамической теории тепловых двигателей. Он работал над этой темой почти непрерывно в течение длительного времени, посылая статью за статьей в Эдинбургское королевское общество. Как мы видели, он дал Джоулю описание эссе Карно о движущей силе тепла и выводов, или некоторых из них, содержащихся в нем. Результат Джоуля и установленный им закон термодинамики дали ключ к корректировке теории Карно, необходимой для приведения ее в соответствие с полным учением об энергии, которое должно учитывать работу, совершаемую при преодолении сопротивлений трения.

Майер из Хайльбронна попытался определить динамический эквивалент тепла в 1842 году, вычислив на основе имеющихся на тот момент данных о двух удельных теплопроводностях воздуха — удельной теплоте при постоянном давлении и удельной теплоте при постоянном объеме — теплотворную способность работы, затраченной на сжатие воздуха из данного объема в меньший. Принцип этого определения легко понять, но он включает в себя предположение, которое не всегда ясновоспринимается. Представим себе, что воздух заключен в цилиндре, закрытом поршнем без трения, который не выходит наружу под давлением воздуха за счет силы, приложенной извне. Дайте воздуху нагреться, чтобы повысить его температуру, в то время как поршень выдвигается, чтобы поддерживать давление постоянным. Если давление равно p , а увеличение объема — dv , работа, совершаемая против внешней силы, равна $p dv$. Пусть повышение температуры составляет один градус по шкале Цельсия, а масса воздуха — один грамм, тепло, отдаваемое газу, равно удельной теплоемкости C_p газа при постоянном давлении, поскольку удельная теплоемкость зависит от температуры лишь незначительно. Но если бы поршень был неподвижен, то тепло, необходимое для такого же повышения температуры, составляло бы C_v , удельную теплоемкость при постоянном объеме. Теперь Майер предположил, что превышение удельной теплоемкости C_p над C_v было тепловым эквивалентом работы, проделанной $p dv$ в первом случае. Таким образом, он получил уравнение $J(C_p - C_v) = p dv$, где J обозначает динамический эквивалент тепла, а C_p , C_v выражены в тепловых единицах. Но если α — коэффициент расширения воздуха при постоянном давлении (то есть $1/273$), а v_0 — объем воздуха при 0°C . Мы имеем $dv = \alpha v_0$, так что $J(C_p - C_v) = \alpha p v_0$. Теперь, если p равна одной атмосфере, скажем, $1,014 \times 10^6$ дин на квадратный сантиметр, а температура равна точке замерзания воды, объем грамма воздуха равен $1/.001293$ в кубических сантиметрах. Следовательно

$$J(C_p - C_v) = \frac{1.014 \times 10^6}{273 \times .001293}$$

из которого, если $C_p - C_v$ известно, значение J можно найти.

Во времена Майера разница в удельной теплоте воздуха была известна недостаточно точно, и поэтому J не могло быть найдено ни с чем подобным точности. Из экспериментов Реньо по удельной теплоемкости при постоянном давлении и из известного соотношения удельных теплоемкостей, выведенного из скорости звука, в сочетании с результатом Реньо, значение $C_p - C_v$ может быть принято за .0686. Таким образом, J получается $42,2 \times 10^6$ в эргах на калорию, что недалеко от истинного значения. Майер получил результат, эквивалентный $36,5 \times 10^6$ эргов на калорию.

Предположение, на котором основан этот расчет, состоит в том, что в результате расширения внутренняя энергия газа не изменяется. Если бы воздух при повышении температуры и в то же время увеличении объема содержал меньше внутренней энергии, чем при простом нагревании без изменения объема, выделяющаяся энергия была бы доступна для содействия выполнению работы, выполняемой против внешних сил, и требовалось бы меньше тепла или, в противоположном случае, требовалось бы больше тепла, чем было бы необходимо, если бы внутренняя энергия оставалась неизменной. Таким образом, подставляя dW для $p dv$, проделанную работу, и для внутренней энергии до расширения и dH для тепла, отдаваемого газу, мы, очевидно, имеем уравнение

$$JdH = de + dW$$

где de - изменение внутренней энергии из-за изменения объема вместе с изменением температуры. Если теперь изменить температуру без расширения, никакая внешняя работа не выполняется, и dW для этого случая равен нулю. Пусть ∂e и ∂H - изменение энергии и подводимое тепло, тогда в этом случае

$$J\partial H = \partial e + 0$$

Таким образом

$$J(dH - \partial H) = de - \partial e + dW$$

и предполагается, что $de = \partial e$, так что $dW = J(dH - \partial H)$; то есть, $dW = J(C_p - C_v)$, когда повышение температуры составляет 1°C , а масса воздуха составляет один грамм. Это предположение требует обоснования, и с помощью эксперимента Джоуля, который был повторен в более чувствительной форме, разработанной Томсоном, было показано, что оно очень близко к истине. Эксперимент Джоуля хорошо известен: объяснение, приведенное выше, может прояснить природу исследований, предпринятых позже Томсоном и Джоулем совместно.

Обратный процесс, преобразование тепла в работу, требовал исследования, и именно это составляет науку термодинамику. Это было предметом знаменитых *Размышлений о могуществе*

Матери дю Фе и о свойствах машин для развития человеческого могущества, опубликованных в 1824 году Сади Карно, дядей покойного президента Французской Республики. Было выпущено всего несколько экземпляров этого эссе, и двадцать четыре года спустя, когда оно было перепечатано Академией наук, его текст был известен очень немногим. Его методы и выводы были изложены Томсоном в 1849 году в мемуарах, которые он озаглавил "Изложение теории Карно о движущей силе тепла". Были включены численные результаты, полученные из экспериментов Рено с паром; и мемуары в целом естественным образом привели Томсона к скорректированной теории тепловых двигателей, которую он опубликовал в 1852 году. Взгляд Карно на работу теплового двигателя был основан на аналогии с выполнением работы потоком воды, спускающимся с более высокого уровня на более низкий. За заданное время из водяного колеса в хвостовом канале вытекает такое же количество воды, какое поступает за это время в колесо из подводящего потока. Теперь тепловой двигатель получает тепло от подающего тела или источника при одной температуре и передает его другому телу (например, конденсатору паровой машины) при более низкой температуре. Этот корпус обычно называют холодильником. Согласно Карно, эти температуры соответствовали двум уровням в случае водяного колеса; тепло было тем, что проходило через двигатель. Таким образом, согласно его теории, тепловая машина отдавала телу при более низкой температуре столько тепла, сколько оно получало от источника. Тепло просто передавалось от тела с более высокой температурой к телу с более низкой; и предполагалось, что этот перенос был источником работы.¹⁷

Первый закон термодинамики, основанный на джоулевой пропорциональности произведенного тепла затраченной работе, и обратный, принятый и проверенный *апостериори*, показал, что эта точка зрения ошибочна и что количество тепла, подаваемого в холодильник, должно быть меньше, чем получаемое от источника, ровно на то количество, которое преобразуется в работу, вместе с теплом, которое в несовершенном двигателе теряется за счет теплопроводности и т.д. Из цилиндра или другой рабочей камеры. Это изменение было внесено Томсоном в его второй работе: но он нашел идеям Карно прямое и плодотворное применение в новой теории. Таков был цикл операций и идеальный реверсивный двигатель.

В цикле Карно рабочее вещество — которое могло быть газом, или паром, или жидкостью, или находящимся в контакте паром и жидкостью : не имело значения, что именно для получения результата, — предполагалось подвергнуть последовательности изменений, при которых конечное состояние совпадало бы с начальным. Таким образом, вещество, приведенное в то же физическое состояние, в котором оно находилось в начале цикла, обладает той же внутренней энергией, что и в начале, и при подсчете работы, проделанной внешними силами или против них, ничего не требует учета рабочего вещества. Это первое большое преимущество метода рассуждения, который ввел Карно.

Идеальный двигатель был очень простым делом, но понятие обратимости трудно выразить в достаточно определенной и четкой форме. Карно не пытается этого сделать; он просто довольствуется описанием определенных циклов операций, которые, очевидно, могут быть выполнены в обратном порядке. Томсон также не идет дальше в своем "Изложении теории Карно", хотя он формулирует критерий совершенного двигателя словами: "Совершенный термодинамический двигатель таков, что независимо от величины механического эффекта, который он может получить от определенного теплового воздействия, если равное количество будет потрачено на его обратную работу, будет получен равный обратный тепловой эффект".

This proposition was proved by Carnot: and the following formal statement in the essay is made: "La puissance motrice de la chaleur est independante des agents mis en œuvre pour la réaliser: sa quantité est fixée uniquement par les temperatures des corps entre lesquels se fait, en dernier résultat, le transport du calorique." Результат, связанный с каждым из них, а именно то, что работа, выполняемая за цикл идеальным двигателем, зависит от температур, при которых он работает, а вовсе не от рабочего вещества, имеет, как мы увидим, наибольшее значение. Доказательство этого утверждения, предполагающее существование более эффективного двигателя, чем идеальный, и связанное с последним, так что более эффективный двигатель выполнял бы цикл вперед, а идеальный двигатель - тот же цикл назад, хорошо известно. По мнению Карно, первый выполнял бы больше работы за счет отвода заданного количества тепла от более высокой температуры к более низкой, чем было затрачено на второй при передаче того же количества тепла от более низкой температуры к более высокой, так что тепло не отбиралось бы и не отдавалось источнику или холодильнику, в то время как в целом был бы прирост работы. Это было бы равносильно признанию того, что полезная работа может выполняться непрерывно без каких-либо результирующих тепловых или иных изменений в агентах, выполняющих эту работу. Даже в то время это нельзя было признать возможным, и, следовательно, предположение о том, что может существовать более эффективный двигатель, чем обратимый, было несостоятельным.

Карно показал, что работа, выполняемая идеальным двигателем при передаче тепла от одной температуры к другой, должна быть найдена с помощью определенной функции температуры, отсюда и название "функция Карно". Соответствующая функция в истинной динамической теории всегда называется функцией Карно. Определенное значение ему придавала, как мы увидим, знаменитая абсолютная термодинамическая шкала температур Томсона.

В свете существующих сейчас фактов и теорий, которые являются почти общими местами в учебниках физики, очень интересно рассмотреть идеи и трудности, возникшие у основателей науки о теплоте шестьдесят лет назад. Например, Томсон спрашивает в своем "Изложении теории Карно", что происходит с механическим эффектом, который может быть вызван теплом, которое передается от одного тела к другому посредством проводимости. Тепло покидает одно тело и поступает в другое, и никакого механического эффекта не возникает: если бы оно передавалось от одного тела к другому через тепловой двигатель, был бы произведен механический эффект: что производится вместо механического эффекта, который теряется? Он называет это очень "запутанным вопросом" и надеется, что вскоре он будет прояснен. Далее он заявляет, что трудности можно было бы полностью избежать, отказавшись от принципа Карно, согласно которому механический эффект достигается "передачей тепла от одного тела к другому при более низкой температуре". Джоуль настаивает именно на таком решении трудности в своей статье "Об изменениях температуры, вызванных разрежением и конденсацией воздуха" (*Phil. Mag.*, май 1845 г.). Томсон отмечает это, но добавляет: "Однако, если мы поступим так, мы столкнемся с бесчисленными другими трудностями, непреодолимыми без дальнейших экспериментальных исследований и полной реконструкции теории теплоты с самого ее основания. В действительности мы должны искать в эксперименте либо подтверждение аксиомы Карно и объяснение рассматриваемой нами трудности, либо совершенно новую основу теории теплоты".

Требуемые здесь эксперименты, как вскоре понял Томсон, уже были проведены Джоулем, и не только при определении динамического эквивалента тепла, но и при чрезвычайно важном

исследовании изменений энергии в цепи гальванического элемента или магнитоэлектрической машины. Более того, ответ на этот "весьма запутанный вопрос" впоследствии был дан самим Томсоном в его статье "Об универсальной тенденции в природе к рассеянию механической энергии", опубликованной в *Эдинбургских трудах* в 1852 году.

Опять же, мы находим, страницей или двумя ранее в "Изложении теории Карно", вопрос, заданный относительно тепла, выделяемого в цепи магнитоэлектрической машины: "Является ли тепло, выделяющееся в одной части замкнутого проводника, просто переданным от тех частей, которые подвержены индуцирующему воздействию?" и утверждение, что Джоуль исследовал этот вопрос и решил, что на него следует ответить отрицательно. Но Томсон продолжает: "Прежде чем мы сможем окончательно заключить, что при таких операциях обязательно выделяется тепло, было бы необходимо доказать, что температура индуцирующего магнита не понижается, и таким образом компенсировать тепло, выделяющееся в проводнике".

Здесь, по-видимому, идея работы, совершаемой при перемещении магнита или проводника в магнитном поле, не приходит в голову Томсону; ибо, если бы это было так, идея о том, что затраченная таким образом работа могла бы иметь свой эквивалент, по крайней мере частично, в виде тепла, выделяемого в цепи, несомненно, пришла бы ему в голову и была высказана. Эта идея была использована всего за год до этого Гельмгольцем в его эссе "Эрхальтунг дер Крафт" для объяснения тепла, выделяемого в цепи индуцированным током, то есть для ответа на первый поставленный выше вопрос в том смысле, в каком на него ответил Джоуль. Однако этот вопрос был полностью разработан Томсоном в статье, опубликованной в *Philosophical Magazine* за декабрь 1851 года, к которой мы обратимся позже.

Таблицы работы, выполняемой различными паровыми двигателями, работающими при различных заявленных температурах, были приведены в конце "Отчета" и сравнены с теоретической "нагрузкой", рассчитанной для идеального двигателя Карно. Конечно, теоретическая мощность была рассчитана исходя из температур котла и конденсатора; гораздо большим падением температуры от топки до котла пренебрегли как неизбежным, так что потери, связанные с этим падением, не принимались во внимание. Теория Карно давала теоретическую нагрузку на одну тепловую единицу (эквивалентную 1390 фут-фунтам работы) 440 фут-фунтов для котла при 140 ° C и конденсатора при 30 ° C; а наилучшая зарегистрированная производительность составила 253 фут-фунта, что дает процент 57,5%. Хуже всего было с обычными двигателями, потребляющими 12 фунтов угля на лошадиную силу в час, и дававшими 38,1 фут-фунта, или 8,6 процента. Эти проценты соответствуют динамической теории 68 и 10.3, поскольку истинная теоретическая нагрузка на тепловой агрегат составляет всего 371 фут-фунт.

Следует отметить, что метод индикаторных диаграмм графического представления изменений в цикле операций принят в "Отчете" Томсона, но не встречается в эссе Карно. Циклы состоят из двух изотермических изменений и двух адиабатических изменений; то есть двух изменений температур источника и холодильника соответственно и двух изменений — от более высокой к более низкой температуре и от более низкой к более высокой. Эти изменения вносятся при условии, что в каждом конкретном случае вещество не получает и не теряет энергию в виде тепла, а охлаждается в одном случае за счет расширения и нагревается в другом за счет сжатия. Индикаторная диаграмма была создана не Томсоном, а Клапейроном (см. стр. 99 выше), который использовал ее для иллюстрации теории Карно.

В номере эдинбургского *Философские труды*" от 2 января 1849 года вместе с "Изложением теории Карно" появилась статья Джеймса Томсона, озаглавленная "Теоретические соображения о влиянии давления на понижение точки замерзания воды". Автор предсказал, что, если не нарушен принцип сохранения энергии, результатом повышения давления на воду в процессе замерзания будет снижение точки замерзания; и он рассчитал на основе теории Карно величину снижения, которая будет вызвана данным увеличением давления. Сделанное таким образом предсказание было проверено экспериментами, проведенными в Физической лаборатории Томсона, и полученные результаты полностью подтвердили выводы, к которым пришла теория. Это предсказание и его проверка справедливо считались имеющими огромное значение в истории динамической теории теплоты; и они представляют собой превосходный пример предсказательного характера истинной научной теории. Теория этого вопроса будет рассмотрена в следующей главе.

ГЛАВА VIII

ТЕРМОДИНАМИКА И АБСОЛЮТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

Первое утверждение истинной динамической теории тепла, основанное на фундаментальной идее о том, что работа, выполняемая в цикле Карно, должна быть объяснена избытком тепла, получаемого от источника, по сравнению с теплом, доставляемым в холодильник, было дано Клаузиусом в статье, которая появилась в "*Анналене*" Поггендорфа в марте и апреле 1850 года и в *Philosophical Magazine* за июль 1850 года под названием, представляющим собой немецкий перевод эссе Карно. В этой статье Первый закон термодинамики четко сформулирован следующим образом: "Во всех случаях, когда работа производится под действием тепла, расходуется количество тепла, пропорциональное количеству произведенной работы, и, наоборот, при затрате этого количества работы вырабатывается точно такое же количество тепла". Современная термодинамика основана на этом принципе и на так называемом Втором законе термодинамики, который, однако, по-разному излагается разными авторами. Согласно Клаузиусу, который использовал в своей статье аргумент, подобный аргументу Карно, основанный на передаче тепла от источника к холодильнику, основой второго закона был тот факт, что тепло имеет тенденцию переходить от более горячих тел к более холодным. В 1854 году (*Pogg. Ann.*, декабрь 1854 г.) он четко сформулировал свой фундаментальный принцип в форме: "Тепло никогда не может переходить от более холодного тела к более горячему, если только в то же время не произойдет какое-либо другое изменение, связанное с этим", и приводит в примечании более короткое утверждение, которое он считает эквивалентным: "Тепло само по себе не может переходить от более холодного тела к более горячему"..

Мы не будем здесь обсуждать способ, которым Клаузиус применил этот принцип, но он пришел ко многим важным результатам и описал их в своей статье, поэтому его следует рассматривать как первооткрывателя. Его теории в первоначальном виде не хватало ясности и простоты, и она была значительно улучшена дополнениями, внесенными в нее при переиздании в 1864 году вместе с другими мемуарами по теории теплоты.

В *Трудах R.S.E.* за март 1851 года Томсон опубликовал свою замечательную статью "О динамической теории теплоты". Было заявлено, что цель статьи состоит из трех частей: (1)

Показать, какие модификации выводов Карно требуются при принятии динамической теории: (2) Указать на значение в этой теории численных результатов, полученных из наблюдений Реньо над паром: (3) указать на некоторые замечательные соотношения, связывающие физические свойства всех веществ, установленные рассуждениями, аналогичными рассуждениям Карно, но основанными на динамической теории.

Эта статья, хотя и последовавшая за работой Клаузиуса, сильно отличается по характеру. Многие результаты идентичны тем, которые ранее были получены Клаузиусом, но они достигаются с помощью процесса, которому предшествует четкое изложение фундаментальных принципов. С тех пор эти принципы были предметом обсуждения, и даже сейчас они не лишены трудностей; но большой шаг вперед был сделан благодаря их тщательной формулировке в статье Томсона в качестве предварительного этапа построения теории и вывода из нее следствий. Сформулированы два положения, которые могут быть приняты за Первый и Второй законы термодинамики. Один эквивалентен Первому закону, изложенному на стр. 116, другой провозглашает принцип Обратимости как критерий "совершенства" теплового двигателя. Мы цитируем эти предложения.

"Реквизит. I (Джоуль).—Когда равные количества механического воздействия производятся любыми способами из чисто тепловых источников или теряются в результате чисто тепловых эффектов, равные количества тепла прекращают свое существование или генерируются".

"Реквизит. II (Карно и Клаузиус).—Если двигатель таков, что при работе в обратном направлении все физические и механические факторы в каждой части его движения меняются на противоположные, он производит столько механического эффекта, сколько может быть произведено любым термодинамическим двигателем с одинаковыми температурами источника и холодильника при заданном количестве тепла".

Реквизит. Я был доказан, предположив, что тепло является формой энергии, и всегда рассматривая работу, совершаемую путем прохождения рабочего вещества через замкнутый цикл изменений, так что не было никаких изменений внутренней энергии, с которыми приходилось бы считаться.

Реквизит. Это было доказано следующей "аксиомой": "Невозможно с помощью неодушевленного материала добиться механического эффекта от какой-либо части материи, охлаждая ее ниже температуры самого холодного из окружающих объектов". Это скорее постулат, чем аксиома, поскольку вряд ли можно утверждать, что он вызывает одобрение сразу после своего утверждения, даже у человека, знакомого с тепловыми явлениями. Однако в нем четко и с достаточной осторожностью излагается принцип, который, когда процесс, посредством которого выполняется работа, всегда является циклическим, не противоречит опыту, и, более того, который может быть сразу же явно применен для демонстрации того, что ни один двигатель не может быть более эффективным, чем реверсивный, и что, следовательно, эффективность реверсивного двигателя не зависит от природы рабочего вещества.

Клерком Максвеллом было высказано предположение, что этой "аксиоме" противоречит поведение газа. Согласно кинетической теории газов, повышение температуры заключается в увеличении кинетической энергии поступательного движения газообразных частиц; и, несомненно, время от времени действительно происходит прохождение некоторых более быстро движущихся частиц из части газа, в которой средняя кинетическая энергия низкая, в

область, в которой средняя кинетическая энергия высока, и, таким образом, перенос тепла из области с низкой температурой в область с более высокой температурой. Максвелл представил себе пространство, заполненное газом, разделенным на два отсека А и В перегородкой, в которой были небольшие безмассовые люки, для открытия и закрытия которых не требовалось затрат энергии. У каждой из этих дверей находился "демон-сортировщик", в обязанности которого входило пропускать каждую частицу, скорость которой превышала среднюю, из пункта А в пункт В, и останавливать все частицы, скорость которых меньше средней. Точно так же демоны должны были помешать всем быстро движущимся частицам перейти из пункта В в пункт А и пропустить все медленно движущиеся частицы. Таким образом, без затрат труда все быстро движущиеся частицы могли быть собраны в одном отделении, а все медленно движущиеся частицы - в другом; и, таким образом, могла возникнуть разница температур между двумя отделениями или увеличиться ранее существовавшая за счет передачи тепла от более холодной массы газа к более горячей.

Вопреки распространенному мнению, этот процесс не делает недействительной аксиому Томсона в том виде, в каком он хотел ее понимать. Ибо упомянутый здесь газ - это то, что он рассматривал бы как рабочее вещество двигателя, за счет циклов которого был получен весь механический эффект; и в конце процесса он не находится в том состоянии по средней кинетической энергии частиц, в котором он находился вначале. Те, кто слышал, как он упоминал об этом в своих лекциях, хорошо знают, что это был его ответ на подразумеваемую критику его аксиомы, содержащуюся в иллюстрации Максвелла. Но, конечно, следует понимать, что вещество возвращается в то же состояние только в статистическом смысле.

Демонстрация Томсоном того, что реверсивный двигатель является наиболее эффективным, хорошо известна, и здесь нет необходимости повторяться в деталях. Реверсивный двигатель может работать в обратном направлении, и рабочее вещество будет поглощать тепло там, где при прямом действии оно его отдавало, *и наоборот*: вещество будет противодействовать внешним силам там, где при прямом действии оно воздействовало на него, *и наоборот*: короче говоря, все физические и механические изменения будут одинаковой величины, но просто обратными, на каждой стадии обратного процесса. Таким образом, если двигатель А более эффективен, чем реверсивный двигатель В, он преобразует в работу больший процент количества тепла H , получаемого от источника, чем реверсивный двигатель, работающий при тех же температурах. Таким образом, если h - это тепло, отдаваемое холодильнику от А, а h' - от В, когда оба работают напрямую и потребляют H ; h должно быть меньше, чем h' . Затем соедините двигатели вместе так, чтобы В работал в обратном направлении, в то время как А работает напрямую. А примет H и доставит h , а также выполнит работу, эквивалентную $H-h$. В возьмет h' из холодильника и доставит H источнику, затратив на эту работу, эквивалентную $H-h'$. В целом тепло не будет отдаваться источнику или отбираться от него; но тепло $h'-h$ будет отбираться из холодильника, и будет выполнена работа, эквивалентная этой. Таким образом, *в результате циклического процесса*, при котором рабочее вещество остается таким, каким оно было, работа выполняется за счет тепла, отбираемого из холодильника, что, согласно постулату Томсона, невозможно. Следовательно, от предположения о том, что существует двигатель, более эффективный, чем реверсивный, следует отказаться; и мы приходим к выводу, что все реверсивные двигатели одинаково эффективны.

Томсон признал в своей статье приоритет Клаузиуса в доказательстве этого утверждения, но заявил, что эта демонстрация пришла ему в голову до того, как он узнал, что Клаузиус

занимался этим вопросом. Теперь он привел в качестве примеров Первого закона термодинамики результаты экспериментов Джоуля, касающихся тепла, выделяемого в цепях магнитоэлектрических машин, и того факта, что когда электрический ток, вырабатываемый тепловым устройством или батареей, приводит в действие двигатель, тепло, выделяемое в цепи при прохождении тока, уменьшается на величину, эквивалентную работе, выполняемой двигателем.

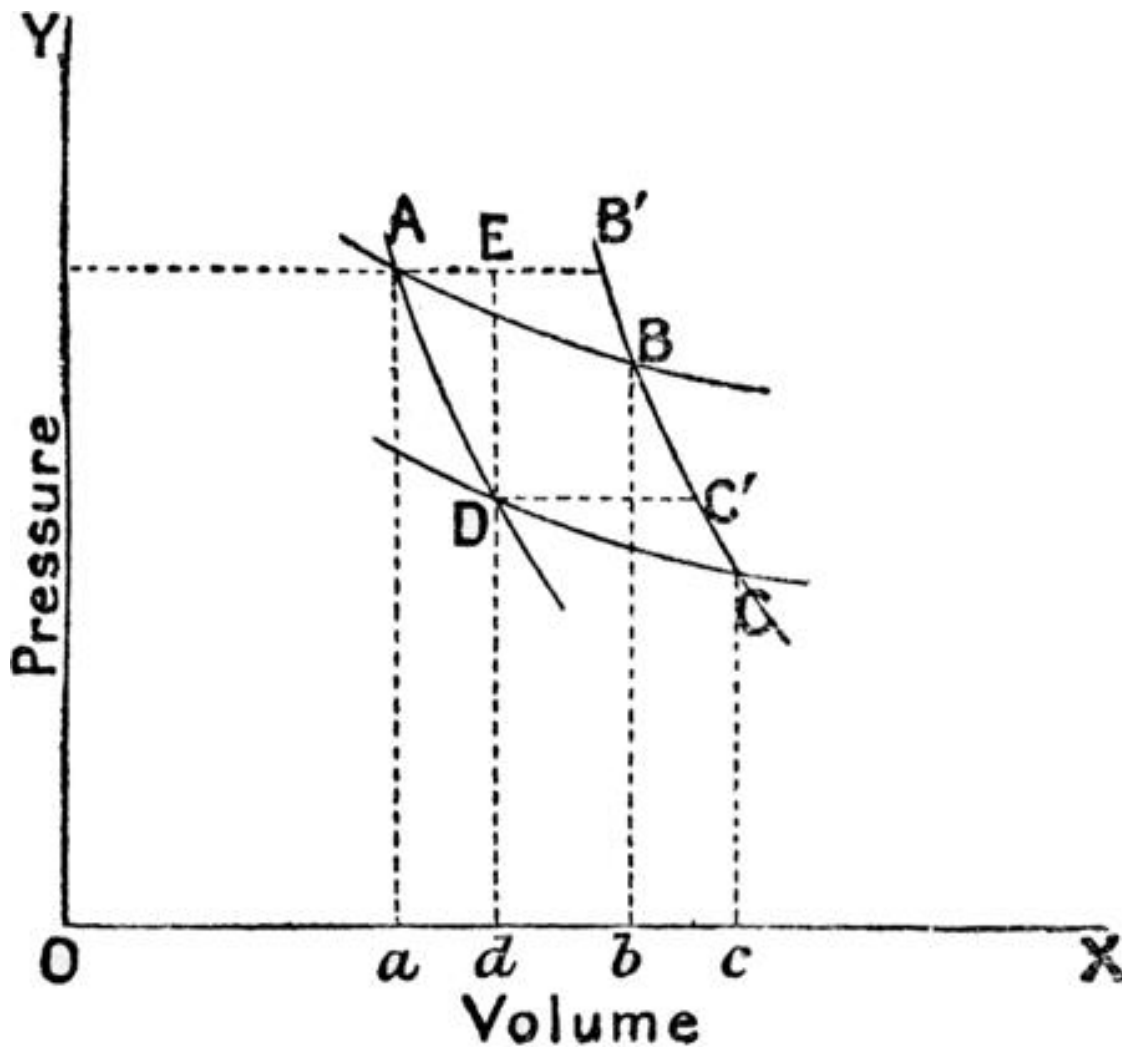


Рис. 12.

В цикле Карно первой операцией является изотермическое расширение (AB на рис. 12), при котором вещество увеличивается в объеме на dv и забирает из источника тепло в количестве Mdv . Вторая операция - это адиабатическое расширение, BC , при котором объем дополнительно увеличивается, а температура опускается на dt до температуры холодильника. Третья операция - это изотермическое сжатие, CD , до тех пор, пока объем и давление не станут такими, что адиабатическое сжатие DA просто вернет вещество в исходное состояние. Если $\partial p / \partial t$ - скорость увеличения давления с температурой при постоянном объеме, то шаг изменения давления от одного изотермического к другому составляет $\partial p / \partial t \cdot dt$; и, таким образом, область замкнутого цикла на диаграмме, которая измеряет внешнюю работу, выполняемую в последовательности изменений, равна $\partial p / \partial t \cdot dt dv$. Теперь, согласно второму закону, проделанная работа должна

составлять определенную долю рабочего эквивалента тепла, Mdv , полученного от источника. Эта фракция не зависит от природы рабочего вещества, но изменяется в зависимости от температуры и, следовательно, зависит от температуры. Его отношение к разнице температур dt между источником и холодильником было названо "функцией Карно", и определение этой функции экспериментальным путем поначалу было, пожалуй, самой важной проблемой термодинамики. Обозначив его через μ , мы имеем уравнение

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \mu M \dots \dots (A)$$

который можно рассматривать как выражающий на математическом языке второй закон термодинамики. M здесь выбрано так, что Mdv - это теплота, выраженная в единицах работы, так что μ не включает джоулев эквивалент теплоты. Это уравнение было дано Карно: здесь оно получено с помощью динамической теории, которая рассматривает проделанную работу как объясняемую исчезновением, а не просто переносом тепла.

Работа, выполняемая в цикле, становится теперь $\mu M dt dv$, или, если H обозначают Mdv , это $\mu H dt$. Таким образом, доля используемого тепла составляет μdt . Это называется *эффективностью* двигателя за цикл.

Из первого закона Томсон получил еще одно фундаментальное уравнение. Для каждого вещества существует соотношение, связывающее давление p (или, в более общем смысле, напряжение определенного типа), объем v (или конфигурацию в соответствии с указанным напряжением) и температуру. Следовательно, мы можем произвольно изменять любые две из этих величин: упомянутое соотношение даст соответствующее изменение третьей. Томсон выбрал v и t в качестве изменяемых величин и предположил, что они должны поддерживать произвольные небольшие изменения dv и dt вследствие прохождения тепла к веществу извне. Количество потребляемого тепла равно $Mdv + Ndt$, где Mdv и Ndt - тепловыделения, необходимые для внесения изменений, взятых отдельно. Но вещество, расширяющееся через dv , выполняет внешнюю работу $p dv$. Таким образом, чистое количество энергии, передаваемой веществу извне, равно $Mdv + Ndt - p dv$ или $(M - p)dv + Ndt$; и если вещество заставить пройти через цикл изменений, чтобы оно вернулось к физическому состоянию, из которого оно началось, вся энергия, полученная в цикле, должна быть равна нулю. Из этого следует, что скорость изменения $M - p$ при изменении температуры, но не объема, равно скорости изменения N при изменении объема, но не температуры. Чтобы убедиться в справедливости этого соотношения, читатель, не знакомый со свойствами совершенных дифференциалов, может поступить следующим образом. Пусть вещество подвергается бесконечно малому замкнутому циклу изменений, определяемому (1) изменением, состоящим из одновременных изменений dv , dt объема и температуры, (2) изменением только dv объема, (3) изменением только dt температуры. $M - p$ и N изменяются таким образом, чтобы иметь определенные значения для начала и конца каждого шага, и соответствующие средние значения могут быть записаны для каждого шага сразу, и, следовательно, значение $(M - p)$

получено $dv + \text{Неразрушающий контроль}$. Складывая вместе эти значения для трех шагов, мы получаем интеграл для цикла. Сразу видно, что условие, при котором это значение должно равняться нулю, соответствует соотношению, указанному выше.

Этот результат в сочетании с уравнением A , полученным из второго закона, дает важное выражение для функции Карно.

Мы не будем продолжать это обсуждение дальше: так много сказано для того, чтобы прояснить, как были получены определенные результаты относительно физических свойств веществ, и объяснить шкалу абсолютной термодинамической температуры Томсона, которая на сегодняшний день является самым важным открытием в области теоретической термодинамики.

Существует несколько шкал температуры: фактически шкала ртутного термометра в стекле определяется процессом градуировки, и поэтому таких шкал столько же, сколько термометров, поскольку нет двух образцов стекла, которые расширяются совершенно одинаково. Равные перепады температур не соответствуют равным приращениям объема ртути, поскольку стеклянная оболочка также расширяется, и по-своему. На шкале газового термометра постоянного давления изменения температуры измеряются изменением объема газа при сохранении постоянного давления; на газовом термометре постоянного объема изменения температуры измеряются изменением давления при сохранении постоянного объема газа. Каждая шкала имеет свое собственное независимое определение, таким образом, если давление газа поддерживать постоянным, а объем при температуре 0°C быть v_0 , а при любой другой температуре быть v , мы определяем числовое значение t , этой последней температуры, по уравнению $v = v_0(1 + Et)$, где E равно $1/100$ увеличения объема, поддерживаемого газом при повышении температуры с 0°C до 100°C . Это эталонные температуры на обычном столбчатом термометре, то есть температура тающего льда и насыщенного пара при стандартном атмосферном давлении соответственно. Таким образом, t имеет значение $(v/v_0 - 1)/E$ и представляет собой температуру (по шкале постоянного давления газового термометра), соответствующую объему v . Равные перепады температур соответствуют равным приращениям объема при 0°C .

Аналогично, в шкале постоянного объема мы получаем определение температуры по давлению p с помощью уравнения $t = (p/p_0 - 1)/E'$, где p_0 - давление при 0°C , а E' равно $1/100$ изменения давления, произведенного повышением температуры с 0°C до 100°C .

Для воздуха E составляет приблизительно $1/273$, и, следовательно, $t = 273(v - v_0)/v_0$. Если мы возьмем случай, когда $v = 0$, то получим $t = -273$. Теперь, хотя эта температура может быть недоступна, мы можем принять ее за ноль, и температура, обозначаемая через t , при отсчете от этого нуля равна $273 + t$. Этот ноль называется абсолютным нулем на воздушном термометре постоянного давления. Значение E' почти такое же, как у E ; и аналогичным образом мы получаем абсолютный ноль для шкалы постоянного объема. Если бы газ в точности подчинялся закону Бойля при всех температурах, E не отличалось бы от E' .

Джоуль в письме от 9 декабря 1848 г. предложил Томсону, что значение μ может быть задано уравнением $\mu = JE/(1 + Et)$. Здесь мы берем тепло в динамических единицах, и поэтому коэффициент J не требуется. С этими единицами измерения Джоуль предполагает, что $\mu = E/(1$

$+Et$), или с $E = 1/273$ $\mu = 1/(273 + t)$, то есть $\mu = 1/T$ где T - температура, отсчитываемая в градусах цельсия от абсолютного нуля воздушного термометра постоянного давления.

Томсоном было показано, что возможность принятия этого значения μ зависит от того, является ли тепло, поглощаемое данной массой газа при расширении без изменения температуры, эквивалентом работы, совершаемой расширяющимся газом против внешнего давления. Тепло H поглощаемое воздухом при расширении из объема V в другой объем V' при постоянной температуре, является интегралом от Mdv , взятым от первого объема ко второму. Но по значению M , приведенному на стр. 121, если W является интегралом от $p dv$, это работа, совершаемая воздухом при расширении, $\partial W / \partial t = \mu H$. Уравнение, выполняемое газом при постоянном давлении (определяющее уравнение для t), $v = v_0(1 + Et)$, дает для интеграла от $p dv$, то есть W , уравнение $W = p v_0(1 + Et) \log(V'/V)$, так что $\partial W / \partial t = EW / (1 + Et)$. Таким образом, $\mu H = EW / (1 + Et)$.

Отсюда следует, что если $\mu = E / (1 + Et)$, то значение H будет просто W . Таким образом, предложенное Джоулем значение μ допустимо только в том случае, если работа, совершаемая газом при расширении из данного объема в любой другой, эквивалентна поглощенному теплу; или, что то же самое, если внешняя работа, совершаемая при сжатии газа из одного объема в другой, эквивалентна выделяемому теплу.

Этот результат, естественно, предполагает формирование новой шкалы термометрии путем принятия определяющего соотношения $T = 1/\mu$, где T обозначает температуру. Определенная таким образом шкала температуры предложена в статье Джоуля и Томсона "О тепловых эффектах жидкостей в движении", часть II, которая была опубликована в "*Philosophical Transactions*" за июнь 1854 года и является тем, что сейчас повсеместно известно как шкала абсолютной термодинамической температуры Томсона. Конечно, можно сделать так, чтобы 100 было числовым значением разницы температур между 0°C и 100°C . Правильно установив единицу измерения T . Эта шкала была естественным преемником в динамической теории той, которую Томсон предложил в 1848 году и которая была основана, согласно идее Карно, на условии, что единица тепла должна совершать одинаковый объем работы при понижении на каждый градус. Это, как он указал, можно было бы справедливо назвать *абсолютной* шкалой, поскольку она не зависела бы от физических свойств любого вещества. В том же смысле шкала, определяемая через $T = 1/\mu$, действительно является абсолютной шкалой.

Новая шкала дает простое выражение для эффективности идеального двигателя, работающего при двух физически заданных температурах, и присваивает числовые значения этих температур; для тепла H , получаемого от источника при изотермическом расширении, которое образует первую операцию цикла (стр. 120), является Mdv , и, как мы видели, работа, выполняемая в цикле, составляет $\partial p / \partial t \cdot dt dv$, или $\mu H dt$. Если мы примем выражение $1/T$ для μ мы можем поставить dT вместо dt ; и мы получаем для проделанной работы выражение $H dT/T$. Таким образом, проделанная работа составляет долю dT/T потребляемого тепла, и это то, что правильно называется эффективностью двигателя за цикл.

Если мы предположим, что разница температур между источником и холодильником конечна, то $T - T'$, скажем, тогда, поскольку T – температура источника, мы имеем для эффективности $(T - T')/T$. Если потребляемое тепло равно H , то отклоняемое тепло равно HT'/T , так что получаемое двигателем тепло относится к отклоняемому им теплу в соотношении T' к T . Таким образом, как это было сделано Thomson, мы можем определить температуры источника и холодильника как пропорциональные теплу, получаемому от источника, и теплу, отводимому холодильнику

совершенным двигателем, работающим при этих температурах. Как уже объяснялось, на шкале можно установить разницу между температурой таяния льда и точкой кипения в 100 градусов, как уже объяснялось. Мы вернемся к сравнению этой шкалы с шкалой воздушного термометра. Сейчас мы рассмотрим некоторые термодинамические соотношения свойств тел, полученные Томсоном.

Сначала мы рассмотрим рабочее вещество двигателя как состоящее из вещества в двух состояниях или фазах; например, лед и вода или вода и насыщенный пар. Давайте применим уравнение (A) к этому случаю. Если v_1 , v_2 быть объемом единицы массы в первом и втором состояниях соответственно, то изотермическое расширение первой части цикла будет происходить в результате преобразования массы dm из первого состояния во второе. Таким образом, dv , изменение объема, равно $dm(\text{объем}_2 - \text{объем}_1)$. Также, если L – скрытая теплота вещества во втором состоянии, *например*, скрытая теплота воды, $Mdv = Ldm$; так что $M(v_2 - v_1) = L$. Если dp – шаг давления, соответствующий шагу dT температуры, уравнение (A) становится

$$\frac{dT}{T} = dp \frac{v_2 - v_1}{L} \dots \dots (B)$$

В случае сосуществования жидкой и твердой фаз это дает нам очень замечательный результат, заключающийся в том, что изменение давления dp повысит или понизит температуру сосуществования двух фаз, то есть температуру плавления твердого вещества, на разность температур, dT , в зависимости от того, v_2 больше или меньше, чем v_1 . Таким образом, такое вещество, как вода, которое расширяется при замерзании, так что $v_2 - v_1$ отрицательно, имеет свойство замерзать. точка опускается при увеличении давления и поднимается при уменьшении давления. Это результат, предсказанный профессором Джеймсом Томсоном и экспериментально подтвержденный его братом (стр. 113 выше). С другой стороны, у такого вещества, как парафин, которое сжимается при затвердевании, температура плавления повышается при увеличении давления и понижается при уменьшении давления.

Те же выводы были бы применимы, когда фазы представляют собой жидкость и пар одного и того же вещества, если бы существовал какой-либо случай, в котором $v_2 - v_1$ является отрицательным. Как мы видим, хорошо известно, что температура равновесия жидкости с ее парами повышается при увеличении давления.

Другим важным результатом уравнения (B) применительно к жидкой и паровой фазам вещества является информация, которую оно дает относительно плотности насыщенных паров. Когда две фазы сосуществуют, давление зависит только от температуры. Следовательно, если известно отношение давления к температуре, dp/dT можно рассчитать или получить графически из кривой; а объем v_2 на единицу массы пара будет выражен в dp/dT , температура T и объем v на единицу массы жидкости. Плотность насыщенного пара при различных температурах очень трудно измерить экспериментально с какой-либо приблизительной точностью, но пока эксперимент продолжается, уравнение (B) подтверждается. Приведенная здесь теория полностью подтверждается другими результатами, и уравнение (B) доступно для расчета v_2 для любого вещества, для которого известно соотношение между p и T . Именно таким образом лучше всего можно определить плотность насыщенного пара.

Мы можем получить другой важный результат для случая рабочего вещества в двух фазах из уравнения (B). Соотношение является

$$\frac{\partial L}{\partial T} + c - h = \frac{L}{T} \dots \dots (C)$$

где c и h - удельные теплоты вещества в двух фазах соответственно, а L - скрытая теплота второй фазы при абсолютной температуре T .

Мы получим это соотношение другим способом, который проиллюстрирует другой способ работы с циклом операций, который использовал Томсон. Любой небольшой этап изменения вещества можно рассматривать как состоящий, скажем, из этапа изменения объема, за которым следует этап изменения температуры, то есть изотермический этап, за которым следует адиабатический этап. Таким образом, любой цикл операций, каким бы он ни был, можно рассматривать как состоящий из серии циклов Карно. Но не рассматривая какой-либо цикл более общего типа, чем цикл Карно, как составленный таким образом, мы можем сделать из него выводы с помощью динамической теории при условии, что только он обратим. Предположим, что, скажем, грамм вещества берется при определенной температуре T в более низкой фазе и при этой температуре заменяется другой фазой. Поглощаемое тепло будет составлять L , а расширение будет составлять $v_2 - v_1$. Затем, поддерживая вещество во второй фазе и в равновесии с первой фазой (то есть, например, если вторая фаза представляет собой насыщенный пар, насыщение должно продолжаться при дальнейшем изменении), понизьте температуру вещества на dT . Тепло, выделяемое веществом, будет равняться hdT , где h - удельная теплоемкость вещества во второй фазе. Теперь при новой температуре $T - dT$ пусть вещество полностью вернется во вторую фазу; выделяемое тепло составит $L - \partial L / \partial T \cdot dT$. Наконец, пусть вещество, теперь снова полностью находящееся в первой фазе, будет доведено до исходной температуры: поглощенное тепло составит cdT , где c - удельная теплоемкость в первой фазе. Таким образом, чистый избыток забираемого тепла по сравнению с выделяемым в цикле нагревом составляет $(\partial L / \partial T + c - h)dT \dots$. На индикаторной диаграмме для указанных изменений это должна быть область цикла или $(v_2 - v_1) \partial p / \partial T \cdot dT$. Но по уравнению (B) $L / T (v_2 - v_1) = \partial p / \partial T$, а площадь цикла равна $(L / T) dT$. Приравняв два найденных таким образом выражения для площади, мы получаем уравнение (C).

К этому соотношению пришел Клаузиус в своей статье, упомянутой выше, и приоритет публикации принадлежит ему: здесь оно приведено в том виде, который оно принимает при использовании шкалы абсолютных температур Томсона.

Результаты экспериментов Реньо по выделению тепла, необходимого для повышения температуры тающего льда на единицу массы воды до любой более высокой температуры и ее испарения при этой температуре, позволяют получить значения L/T и $\partial L / \partial T$ необходимо вычислить и, следовательно, найти значение h . Похоже, что h является отрицательным для всех температур, к которым можно применить экспериментальные результаты Реньо. Это, как указывал Томсон, означает, что если массу насыщенного пара заставить расширяться так,

чтобы в то же время понизить температуру, ей должно быть отдано тепло, иначе она частично сконденсируется в жидкость; и, с другой стороны, если пар сжать и повысить температуру, в то же время сохраняя его насыщенным, от него необходимо отнять тепло, в противном случае пар перегреется и, таким образом, перестанет быть насыщенным.

Здесь удобно обратить внимание на статью о *теплоте* которую Томсон написал для девятого издания *Британской энциклопедии*. В этой статье он дал ценное обсуждение обычной термометрии, термометрии с помощью давлений насыщенных паров различных веществ — паровых термометров, как он их называл, - абсолютной термодинамической термометрии, обогащенной новыми экспериментальными и теоретическими исследованиями, и приложил ко всему ценный краткий обзор, с собственными дополнениями, математики теплопроводности Фурье.

Впервые обратившись к температуре, измеряемой расширением жидкости в менее расширяемом сосуде, он показал, как она в действительности рассчитывается численно. Это сводилось к обсуждению шкалы обычного ртутного стеклянного термометра - предмета, относительно которого в учебниках нередко делаются ошибочные утверждения. Краткий обзор трактовки этого Томсоном приведен здесь.

Рассматривая этот термометр как сосуд, состоящий из стеклянной колбы и длинной стеклянной ножки с мелким и равномерным отверстием, герметично закрытый и содержащий только ртуть и пары ртути, он объяснил числовое соотношение между температурой, показываемой прибором, и объемами ртути и сосуда. Шкала действительно определяется принятым методом градуации. На ножке, на которой находится верхняя часть ртути, отмечены две точки отсчета, когда сосуд погружен (1) в тающий лед, (2) в насыщенный пар при стандартном атмосферном давлении. Стержень разделен на части с равным объемом отверстия между этими двумя точками и за пределами каждой из них. Для стоградусного термометра расстояние между двумя точками делится на 100 равных частей, и нижняя точка отсчета обозначается 0 и верхняя 100, а остальные разделительные метки нумеруются в соответствии с этим вдоль стержня. Каждая из этих частей отверстия может быть названа градусным пространством.

Теперь пусть прибор содержит в своей колбе и ножке, вплоть до отметки 0, N градусных интервалов, и пусть v будет объемом градусного интервала при этой температуре. Объем до отметки 0 при этой температуре будет составлять Nv ; и если вещество сосуда будет совершенно однородным по качеству и свободным от напряжений, то N будет одинаковым при всех температурах. Если v_0 - объем градусного пространства при температуре тающего льда, то объем ртути при этой температуре будет составлять Nv_0 . Если G - расширение стекла при увеличении объема градусного пространства с v_0 до v при повышении температуры, то $v = v_0(1 + G)$. Объем ртути был увеличен таким образом, чтобы $(N+n)v$ и $Nv_0(1 + G)$ той же подъем температуры, если в верхней части столбца таким образом, чтобы подняться с отметки 0 с тем, чтобы занять N степени-пространств больше, чем раньше. Но если E - расширение ртути между температурой таяния льда и той, которая достигнута сейчас, то объем ртути также равен $Nv_0(1 + E)$. Следовательно, $N(1 + E) = (N+n)(1 + G)$. Это дает $n = N(E - G)/(1 + G)$.

Если мы возьмем, как обычно, n в качестве измерения температуры и заменим его символом t , мы имеем, поскольку $N = 100$ $(1 + G_{100})/(E_{100} - G_{100})$,

$$1 = 100 \frac{1 + G_{100}}{1 + G} \frac{E - G}{E_{100} - G_{100}} \dots \dots (D)$$

В этом исчислении определение любой температуры, скажем, 37 ° С, представляет собой температуру сосуда и его содержимого, когда верхушка ртутного столба находится на отметке 37 выше 0 на шкале, определяемой градуировкой прибора; но числовое значение по отношению к объемам задается уравнением (D). Это показывает, что численное измерение любой температуры включает в себя как расширение сосуда, так и расширение стеклянного сосуда между температурой таяния льда и рассматриваемой температурой. Этот результат может противоречить часто делаемому ошибочному утверждению, что равные приращения температуры соответствуют равным приращениям объема термометрического вещества. Это также показывает, что различные ртутные стеклянные термометры, какими бы точно изготовленными и градуированными они ни были, не обязательно должны совпадать при помещении в ванну при любой температуре, отличной от 0 ° С или 100 ° С. На этом факте и результатах сравнения термометров, изготовленных из разных видов стекла, с обычным воздушным термометром, которое проводил Реньо, Томсон всегда настаивал в своем преподавании, когда он рассматривал тему тепла. Шкала ртутного термометра в стекле слишком часто в учебниках и даже в Актах парламента рассматривается как совершенно определенная вещь, и расширение газа нередко определяется этой неопределенной шкалой, вместо того чтобы использоваться, как это должно быть, в качестве основы для определения шкалы газового термометра. Вся трактовка так называемых газовых законов слишком часто, с логической точки зрения, представляет собой массу путаницы.

В своей статье о *теплоте* Томсон дал два определения шкалы абсолютной температуры. Одним из них является то, что указано на стр. 126 выше, а именно, что температура источника и холодильника определяется отношением тепла, получаемого от источника, к теплу, отдаваемому холодильнику, когда двигатель описывает цикл Карно, состоящий из двух изотермических и двух адиабатических изменений.

Другое определение лучше адаптировано для общего использования, поскольку оно применимо к любому циклу, который является обратимым. Дайте рабочему веществу расшириться при постоянном давлении на величину dv (AB' на рис. 12), и одновременно дайте веществу нагреться H . Выполняемая внешняя работа называется pdv . Thomson вызвал pdv/H коэффициент полезного действия. Теперь пусть температура будет повышена на dT , не отдавая тепла веществу и не отбирая у него тепло, и пусть соответствующее повышение давления будет dp ; и назовем dp/p отношением давлений. Температурный коэффициент dT/T равно произведению коэффициента работы на коэффициент давления, то есть

$$\frac{dT}{T} = \frac{dvdp}{H}$$

Это совершенно верно; поскольку $dvdp$ - это область цикла, подобного $AB'C'D$, представленного на рис. 12, для которого потребляется определенное количество тепла H , хотя в данном случае не строго при одной температуре. И ясно, поскольку на рис. 12 переход от B' к B является адиабатическим, H - это тепло, которое необходимо было бы принять для изотермического изменения AB в цикле Карно $ABCD$, который имеет ту же площадь, что и $AB'C'D$. Таким образом, эффективность цикла составляет $dvdp/H$, и это по прежнему определению равно dT/T .

Или мы можем рассматривать этот вопрос следующим образом: —Количество тепла H , которое соответствует бесконечно малому расширению, dv может быть использовано в уравнении (A) независимо от того, является расширение изотермическим или нет, если мы примем T в качестве средней температуры расширения. Следовательно, мы имеем $dp/dT = H/(dv \cdot T)$, то есть $dT/T = dpdv/H$. Теорема на стр. 128 получается тем, что фактически является этим процессом.

Сравнение абсолютной шкалы со шкалой воздушного термометра

Сравнение, проведенное Джоулем и Томсоном абсолютной термодинамической шкалы со шкалой газового термометра постоянного давления, уже упоминалось, и было показано, что две шкалы были бы точно согласованы, то есть абсолютная температура была бы просто пропорциональна объему газа в газовом термометре, поддерживаемом при температуре, подлежащей измерению, если бы внутренняя энергия газа не изменялась изменением объема без изменения температуры, то есть если бы $de = 0$ де на стр. 107 выше были равны нулю. Джоуль проверил, так ли это, погрузив два сосуда, соединенные трубкой, которую можно было открывать или закрывать с помощью запорного крана, в воду калориметра, определив температуру с помощью очень чувствительного термометра, а затем позволив воздуху, который уже был сжат в одном из сосудов, перетечь в другой, который изначально был пуст. Было обнаружено, что никакого изменения температуры воды в калориметре, которое можно было наблюдать, произведено не было. Но в результате этого процесса объем воздуха увеличился вдвое, и если бы произошло какое-либо ощутимое изменение внутренней энергии, это проявилось бы в повышении или понижении температуры воды, в зависимости от того, уменьшилась или увеличилась энергия.

Томсон предположил, что подлежащий исследованию газ следует пропускать через трубу, заканчивающуюся тонким соплом, или, предпочтительно, через пробку из пористого материала, помещенную в трубу, по которой газ нагнетается насосом, и проводить наблюдения за температурой в постоянном потоке с обеих сторон пробки. Эксперименты проводились с пробкой из спрессованной ваты, зажатой между двумя металлическими дисками с отверстиями, в трубке из самшита, также окруженной ватой, и помещенной в ванну с водой, плотно окружающую подводящую трубу. Он был сделан из металла и образовывал конец

длинной спирали, полностью погруженной в ванну. Таким образом, температура газа, приближающегося к пробке, поддерживалась на постоянном уровне, определяемом тонким термометром; другой термометр показывал температуру в постоянном потоке за пробкой.

В случае с водородом эксперименты показали небольшой нагревательный эффект при прохождении через пробку; воздух, кислород, азот и углекислота охлаждались при прохождении.

Теория этого вопроса изложена в оригинальных статьях и в очень элегантной форме в статье *отеплоте*. Результат анализа показывает, что если ∂w - положительное или отрицательное рабочее значение теплоты, которое преобразует один грамм газа после прохождения до его первоначальной температуры; и T - абсолютная температура, а v объем грамма газа при давлении p , а разность давлений на двух сторонах пробки равна dp , то выполняется уравнение

$$\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial v} = \frac{1}{v + \frac{\partial w}{dp}} \dots \dots (E)^{18}$$

Джоулем и Томсоном было обнаружено, что ∂w было пропорционально dp для значений dp до пяти или шести атмосфер. Однако при различных температурах в случае водорода было обнаружено, что эффект нагрева уменьшается с повышением температуры, составляя 0,100 градуса по Цельсию при 4 ° или 5 ° по Цельсию и 0,155 при температурах от 89 ° до 93 ° по Цельсию при разнице давлений, обусловленной 100 дюймами ртутного столба.

Если нет ни нагрева, ни охлаждения $\partial w = 0$, и мы получаем путем интегрирования $T=Cv$, где C является константой.

Подробное обсуждение теории этого эксперимента можно найти в современных трактатах по термодинамике и в различных недавних мемуарах, а дифференциальное уравнение по-разному модифицировалось и интегрировалось на основе различных предположений, которые здесь было бы неуместно обсуждать.

Охлаждающий эффект пропускания газа, такого как воздух или кислород, через узкое отверстие использовался для сжижения газа. Поток газа прокачивается по трубе к отверстию, и тот газ, который прошел через отверстие и был слегка охлажден, направляется на обратном пути к насосу по внешней стороне трубы, по которой больше газа приближается к отверстию и, таким образом, слегка охлаждает поступающий поток. Газ, который выходит позже, таким образом, холоднее, чем тот, который выходил раньше, и процесс продолжается до тех пор, пока выходящий газ не сжижается и не попадает в нижнюю часть трубы, окружающую отверстие, откуда его можно отводить в сосуды, сконструированные для его приема и сохранения.

Таким образом, возможно сжижение водорода, что показывает, что при низкой температуре, при которой обычно начинается процесс (применяется первоначальное охлаждение), прохождение через отверстие оказывает охлаждающий эффект, как и в других случаях.

Здесь можно упомянуть другую идею, идею *термодинамической подвижности*, на которой, по предположению Томсона, может быть основано плодотворное изложение предмета термодинамики. Это было изложено в письме, написанном профессору Тейту в мае 1879 года. Если задана система тел с разными температурами, то можно привести их к общей температуре и тем самым извлечь из них определенное количество механической энергии. Для этой цели температуры должны выравниваться совершенными термодинамическими двигателями, работающими, скажем, между конечной температурой T_0 и температурами различных частей системы. Этот процесс заключается в повышении и понижении температуры; и температура T_0 такова, что именно тепло, выделяемое при T_0 определенными двигателями, получающими тепло от тел с более высокой температурой, чем T_0 , подается в двигатели, которые работают между T_0 и телами с более низкими температурами. Вся полезная работа, полученная таким образом, была названа Томсоном *подвижностью* системы. Конечно, выравнивание температуры может быть достигнуто за счет теплопроводности, и в этом случае теряется энергия, которая могла бы быть использована. С двумя равными и подобными телами при абсолютных температурах T, T' температура, до которой они снижаются при извлечении их подвижности, равна $\sqrt{TT'}$. Если температуры уравнивать за счет электропроводности, результирующая температура будет выше и составит $\frac{1}{2}(T+T')$. Таким образом, если для работы двигателей доступны только два тела, подвижность является мерой потери энергии, когда теплопроводность приводит к выравниванию температуры.

Очень наводящая на размышления статья на эту тему была опубликована лордом Кельвином в *Trans. R.S.E.*, том 28, 1877-8.

Рассеивание энергии

В связи с теорией теплоты следует упомянуть великое обобщение Томсона - теорию диссипации энергии. ¹⁹ Большинство людей имеют некоторое представление о значении физической доктрины сохранения энергии, хотя в популярных дискурсах это обычно искажается. Имеется в виду, что в конечной материальной системе, которая изолирована в том смысле, что на нее не воздействует сила извне, общее количество энергии, то есть энергии движения и энергии взаимного расположения (включая энергию химического сродства) частей, остается постоянным. Обычное искажение состоит в том, что энергия Вселенной постоянна. Это может быть правдой, если *вселенная* конечна; если вселенная бесконечна по протяженности, утверждение не имеет смысла. В любом случае, мы ничего не знаем о Вселенной в целом и поэтому не делаем никаких заявлений относительно нее.

Но пока, таким образом, сохраняется или постоянство количества энергии в изолированной и конечной материальной системе, эта энергия может стать недоступной для жителей системы. Ибо полезная работа внутри такой системы совершается путем преобразования энергии из одной формы в другую, а общее количество остается неизменным. Но если это преобразование предотвращено, все процессы, которые связаны с таким преобразованием, должны прекратиться, и среди них жизненно важные процессы.

Недоступная форма, которую принимает энергия системы, с которой мы имеем непосредственное отношение в настоящее время, независимо от того, что с нами может случиться в конечном итоге, согласно теории Томсона, - это универсально рассеянное тепло. Как это происходит, можно увидеть следующим образом. Даже идеальный двигатель, если в холодильнике установлена самая низкая доступная температура, выделяет некоторое

количество тепла, которое не может быть использовано для выполнения работы. Это тепло распространяется за счет проводимости и излучения к окружающим телам, а следовательно, и к телам, более удаленным, и общая температура системы повышается. Более того, поскольку тепловые двигатели несовершенны, тепло отводится в окружающую среду за счет теплопроводности и вырабатывается за счет работы, выполняемой против трения, так что тепло, выделяемое на недоступные объекты или кучу отходов, еще больше увеличивается.

Теплопроводность является великим средством, с помощью которого энергия все больше и больше рассеивается в этой недоступной форме по всей совокупности материальных тел. Как было видно, доступная подвижность постоянно растрачивается впустую; а при потоке тепла в земле, на солнце и других неодинаково нагретых телах нашей системы потери энергии огромны. С помощью конвекционных течений в воздухе и океане он постоянно выравнивает температуры, но делает это с огромными затратами полезной энергии.

Затем, при наших безумно расточительных методах обогрева наших домов открытым огнем, при сжигании половины угля, используемого в топках котлов, и позволении неиспользованному углероду выбрасываться в атмосферу в огромных количествах, в то время как очень большая часть фактически вырабатываемого тепла уходит по дымоходам с нагретыми газами, запасы недоступного тепла увеличиваются с такой скоростью, которая повлечет за собой большие страдания, если не гибель, для человечества в неопределенно отдаленном будущем. Было бы верхом неосторожности полагаться на перспективу, нередко упоминаемую в настоящее время, использования энергии, заключенной в атомной структуре материи. Глупцом был бы тот, кто расточительно растратил бы богатство, которым он обладает, в надежде, что сможет окупить себя за счет рудников, разработка которых, как показывает весь накопленный на данный момент опыт, требует затрат, намного превышающих любую полученную прибыль.

Не является исключением из нашей нынешней темы призыв к тому, что государственным деятелям давно пора заняться вопросом национальной экономии топлива и желательности использования путем облесения солнечной энергии, которая постоянно расходуется на поверхности земли. Если бы государственные деятели только ознакомились с результатами физической науки в этой великолепной области космической экономики, появилась бы некоторая надежда, но, увы! как правило, их образование неизбежно приводит к пренебрежению, если не к пренебрежительному отношению к преподаванию физики.

По причинам, о которых говорилось выше, энергия постоянно рассеивается, но не уничтожается, а все в большем и большем количестве задерживается в общем тепле тел. Всегда есть трение, всегда есть теплопроводность и конвекция, так что по мере того, как расходуются наши запасы энергии движения или позиционного положения, будь то несвязанные химические вещества, движение земли или что-то еще, неизбежная доля, слишком часто значительная, теряется и общая температура повышается. После того, как большая часть всей существующей энергии будет потрачена таким образом на то, чтобы поднять мертвый уровень вещей, разница температур, достаточная для работы тепловых двигателей, будет невозможна, и неизбежная смерть всего сущего будет приближаться с головокружительной быстротой.

Термоупругость и термоэлектричество

Во втором определении шкалы абсолютной температуры, которое только что обсуждалось, напряжение любого типа может быть заменено давлением, а соответствующее смещение s - изменением объема. Таким образом, для куска эластичного материала, прошедшего цикл изменений, мы можем заменить dS на dp и Ads на dv ; где A - такой коэффициент, что $ADSD$ представляет собой работу, выполняемую при смещении ds напряжением dS . В качестве примера рассмотрим проволоку, подвергнутую простому продольному напряжению S . Происходит продольное растяжение, но это не единственное изменение; одновременно происходит поперечное сжатие. Однако в определенных пределах пропорционально S .

Пусть проводу в динамическом режиме передается тепло dH , в то время как напряжение S поддерживается постоянным, и пусть растяжение увеличивается с s до $s+ds$. Напряжение S будет выполнять работу $ASds$ на проволоке, и коэффициент работы будет равен $-PAC/dH$. Теперь пусть напряжение увеличится до $S+dS$, при этом растяжение останется постоянным, а абсолютная температура увеличится с T до $T+dT$. Коэффициент напряжения (как мы можем это назвать) равен dS/S и температурное отношение dT/T . Таким образом, мы получаем (стр. 134 выше)

$$-\frac{dS}{dT} = \frac{1}{TA} \frac{dH}{ds}$$

В своей статье о *нагреве* Томсон использовал изменение e деформации при постоянном напряжении (то есть ds/l , где l - длина проволоки), соответствующее количеству тепла, достаточному для повышения температуры при постоянном напряжении на 1° . Следовательно, если K - удельная теплоемкость при постоянном напряжении, а le ставится вместо ds в только что указанном смысле, мы имеем

$$dT = -\frac{TedS}{K\rho} \dots \dots (F)$$

где ρ - плотность, поскольку $dH=K\rho lA\Delta\theta$

Отношение dH к увеличению ds растяжения является положительным или отрицательным, то есть вещество поглощает или выделяет тепло при растяжении в условиях постоянного напряжения, согласно dS/dT является отрицательным или положительным. Или мы можем выразить то же самое другим способом, который часто бывает полезен. Если провод, подвергнутый постоянному напряжению, нагревается, то ds является отрицательным или положительным, другими словами, провод укорачивается или удлиняется в соответствии с

dS/dT является положительным или отрицательным, то есть в зависимости от того, увеличивается или уменьшается напряжение для данной деформации при повышении температуры.

Из эксперимента известно, что металлическая проволока расширяется при постоянном напряжении, когда к ней подводится тепло, и, таким образом, из уравнения (F) мы узнаем, что напряжение, необходимое для данной деформации, уменьшается при повышении температуры проволоки. Опять же, полоса каучука, растягиваемая грузом, укорачивается при повышении ее температуры, следовательно, напряжение, необходимое для данной деформации, увеличивается при повышении температуры.

Эти результаты, с качественной точки зрения, самоочевидны. Но из изложенного будет очевидно, что уравнение, в точности аналогичное (F), выполняется независимо от того, принимается ли изменение ds as taken as before under constant stress, or at uniform temperature, or whether the change dS of SS осуществляется адиабатически или при постоянном напряжении

Во всех этих случаях используется одно и то же уравнение

$$dT = - T \frac{edS}{K\rho} \dots \dots (G)$$

применяется с учетом изменения значения dT .

Это уравнение отличается от уравнения Томсона, приведенного в разных местах (*например, в статье Британской энциклопедии по упругости*, которую он также написал), отрицательным знаком в правой части, но разница только кажущаяся. Согласно его спецификации, *давление* было бы положительным напряжением, а *расширение* - положительным смещением, и при применении уравнения к числовым примерам это необходимо иметь в виду, чтобы каждой числовой величине можно было присвоить соответствующие знаки. В качестве примера адиабатического изменения можно рассматривать внезапное удлинение проволоки, на которое уже ссылается увеличение напряжения dS . Если нет времени для прохождения тепла от провода или к окружающей среде, изменение температуры будет задано уравнением (G).

Это уравнение было применено Томсоном (статья *Упругость*), чтобы найти соотношение между тем, что он назвал кинетическим модулем упругости и статическим модулем, то есть между модулем адиабатической деформации и модулем изотермической деформации.

Увеличение деформации, вызванное повышением температуры на 1° , равное, и, следовательно, edT , то есть $-Te^2dS/K\rho$, представляет собой увеличение деформации из-за внезапного повышения температуры dT . Это, добавленное к изотермической деформации, создаваемой dS , даст полную адиабатическую деформацию. Таким образом, если M - статический или изотермический модуль упругости, то адиабатическая деформация равна $dS/M - Te^2DS/K\rho$. Если M' обозначить кинетический или адиабатический модуль упругости, то его значение равно dS , деленному на всю адиабатическую деформацию, то есть, $M' = M / (1 - MTe^2/K\rho)$ and the ratio $M'/M = 1 / (1 - MTe^2/K\rho)$.

Хорошо известно и легко доказать без использования какой-либо теоремы, которую можно правильно назвать термодинамической, что это отношение модулей равно отношению удельной теплоемкости K вещества в условиях постоянного напряжения к удельной теплоемкости N в условиях постоянной деформации соответствующего типа. Это, действительно, самоочевидно, если рассмотреть два изменения напряжения, одно изотермическое, другое адиабатическое, *которые производят одинаковые этапы смещения* ds , и следует помнить, что шаг ∂T температуры, который сопровождает адиабатическое изменение, можно рассматривать как состоящий из шага dT температуры, сопровождающего смещение ds , осуществляемое при постоянном напряжении, и затем двух последовательных шагов dT и ∂T , осуществляемого при постоянном напряжении, наряду со шагами напряжения dS . Легко видеть, что отношение M'/M имеет значение $(\partial T + dT)/dT$, и поскольку $-KdT + N(\partial T + dT) = 0$, по условию адиабаты теорема доказана.

Знаменитый результат Лапласа для воздуха, согласно которому адиабатический объемный модуль равен статическому объемному модулю, умноженному на отношение удельной теплоемкости постоянного давления воздуха к удельной теплоемкости постоянного объема воздуха, является частным примером этой теории.

Томсон показал в статье "*Упругость*", как по значению M'/M , полученному, как указано выше, из термодинамической теории, значение K/N мог быть получен для разных веществ и для разных типов напряжений и давал очень интересные таблицы результатов для твердых тел, жидкостей и газов, подвергнутых воздействию давления (объемный модуль упругости), и для твердых тел, подвергнутых продольному напряжению (модуль Юнга).

Обсуждение соотношения адиабатического и изотермического модулей упругости является частью очень важной статьи "Термоупругие, термомагнитные и термоэлектрические свойства вещества", которую он опубликовал в *Philosophical Magazine* за январь 1878 года. В основном это была перепечатка статьи, озаглавленной "О термоупругих и термомагнитных свойствах вещества, часть I", которая появилась в апреле 1855 года в первом номере *Quarterly Journal of Mathematics*. В этой статье рассматривалась только термоупругость; термомагнитные результаты, однако, были указаны в статье "Термомагнетизм" во втором издании *Энциклопедии физических наук*, отредактированном и в значительной части написанном профессором Дж. П. Николом и опубликованном в 1860 году. Для той же *энциклопедии* Томсон также написал статью, озаглавленную "Термоэлектрическое, подразделение I.-пироэлектричество, или термоэлектричество непроводящих кристаллов", а расширенная *Phil. Mag.* статья также содержала применение термодинамики к этому виду термоэлектрического воздействия.

Эта великая статья не может быть описана без большого объема математического анализа; но у студента, прочитавшего более ранние термодинамические статьи Томсона, не возникнет особых трудностей в ее освоении. Здесь достаточно сказать, что его можно рассматривать как лейтмотив большей части общей термодинамической трактовки физических явлений, которая составляет столь значительную часть физической математики наших дней и которой мы обязаны Уилларду Гиббсу Дюэму и другим современным авторам.

Однако до публикации этой статьи Томсон применил термодинамическую теорию к термоэлектрическим явлениям. Длинная серия статей, содержащих экспериментальные исследования и озаглавленных "Электродинамические свойства металлов", помещена во втором томе его *математических и физических работ*. Эта серия начинается с Лекции

Бейкериана (опубликованной в *Трудах Королевского общества* за 1856 год), которая включает отчет о замечательной экспериментальной работе, проделанной за предыдущие четыре или пять лет добровольческим лабораторным корпусом в недавно созданной физической лаборатории в старом колледже. Рассматриваются такие темы, как электрическая конвекция тепла, термоэлектрические инверсии, влияние механической деформации и намагничивания на термоэлектрические свойства металлов, а также влияние натяжения и намагничивания на электропроводность металлов. Здесь можно дать лишь очень краткое представление о термодинамическом подходе и природе замечательного открытия Томсоном электрической конвекции тепла.

Зеебеком в 1822 году было обнаружено, что когда цепь сформирована из двух разных металлов (без какого-либо элемента или батареи), ток течет по цепи, если два перехода не имеют одинаковой температуры. Например, если два металла представляют собой стержни из сурьмы и висмута, соединенные на своих концах так, чтобы образовать замкнутую цепь, и один спай нагревается, в то время как другой поддерживается при обычной температуре, ток течет через горячий спай в направлении от висмута к сурьме. Аналогично, если цепь сделана из медной проволоки и железной проволоки, ток проходит через более теплый переход от меди к железу. Сила тока — при прочих равных условиях — зависит от используемых металлов; например, висмут и сурьма более эффективны, чем другие металлы.

Пельтье обнаружил, что когда ток, скажем, от батареи, подается по такой цепи, этот переход охлаждается, а этот переход нагревается при прохождении тока, который, будучи соответственно нагретым и охлажденным, без элемента вызвал бы протекание тока в том же направлении. Таким образом, ток, создаваемый разницей температур соединений, вызывает поглощение тепла более теплым соединением и выделение тепла более холодным соединением.

Это, естественно, натолкнуло Томсона на мысль рассмотреть схему из двух металлов со спаями при разных температурах в качестве теплового двигателя, источником которого был горячий спай, а холодный — холодильник, в то время как тепло, выделяемое в цепи током и другой выполняемой работой, если таковая имела, было эквивалентно разнице между поглощенным теплом и выделяемым теплом. Конечно, в такой конструкции всегда имеет место необратимая потеря тепла из-за теплопроводности; но когда такие потери должным образом учтены, контур можно правильно рассматривать как реверсивный двигатель.

Вскоре после открытия Зеебека Каммингом было обнаружено, что при повышении температуры горячего спая электродвижущая сила увеличивалась все медленнее, при определенной температуре горячего спая принимала максимальное значение, а затем по мере дальнейшего повышения температуры горячего спая начинала уменьшаться и, в конечном итоге, при достаточно высокой температуре в большинстве случаев меняла знак. Было обнаружено, что температура максимальной электродвижущей силы не зависит от температуры более холодного перехода. Это называется температурой нейтральной точки, исходя из того факта, что если два соединения термоэлектрической цепи поддерживать при постоянной небольшой разнице температур и повышать температуру обоих до тех пор, пока одно из них не достигнет температуры выше нейтральной точки, а другое — ниже, электродвижущая сила будет падать, пока, наконец, при достижении этой точки она не станет равной нулю.

Таким образом, было обнаружено, что для каждой пары металлов существует по крайней мере одна такая температура горячего спая, и предполагалось, что последствия согласуются с результатами эксперимента, когда температура была нейтральной, в месте спая не происходило ни поглощения, ни выделения тепла. Но затем источник, предусмотренный только что изложенной термодинамической точкой зрения, перестал существовать. Ток все еще тек, происходило выделение тепла в холодном соединении, а также джоулево выделение тепла в проводах цепи вследствие их сопротивления. Следовательно, было ясно, что энергия должна быть получена в другом месте, а не на стыках. Томсон решил проблему, показав, что (помимо джоулева выделения тепла) происходит поглощение (или выделение) тепла, когда ток течет в проводнике, вдоль которого существует градиент температуры. Например, когда электрический ток течет по неравномерно нагретому медному проводу, выделяется тепло там, где ток течет от горячих частей к холодным, и тепло поглощается там, где поток идет от холодного к горячему. Когда горячий спай находится при температуре нулевого поглощения или выделения тепла — так называемой нейтральной температуре — тепло, поглощаемое в потоке цепи вдоль неравномерно нагретых проводников, превышает тепло, выделяемое в целом, на величину, эквивалентную электрической энергии, затраченной в цепи за то же время.

Более того, было обнаружено, что количество тепла, поглощаемого данным током при подъеме или спуске при заданной разнице температур, различно у разных металлов. Когда ток равнялся единице тока, а разница температур также единице, Томсон называл тепло, поглощенное или выделяющееся в металле, удельной теплоемкостью электричества в металле — название, которое в некоторых отношениях удобно, но в других вводит в заблуждение. Этот термин скорее передает представление о том, что электричество имеет материальное существование. Вещество, такое как медь, свинец, вода или ртуть, обладает удельной теплотой в совершенно понятном смысле; электричество не является веществом, следовательно, не может быть в том же собственном смысле удельной теплоты электричества.

Однако это поглощение и выделение тепла было экспериментально и математически исследовано Томсоном, и в настоящее время в обсуждениях термоэлектрики его обычно называют "эффектом Томсона".

Часть VI (*Пер. R.S., 1875*) "Исследований электродинамических свойств металлов" посвящена влиянию силы растяжения и сжатия, а также кручения на намагничивание железа и стали, а также никеля и кобальта.

Одним из основных результатов было открытие, что эффект продольного натяжения заключается в увеличении индуктивной намагниченности мягкого железа, а поперечного — в ее уменьшении, пока намагничивающее поле не превышает определенного значения. При превышении этого значения, которое зависит от образца, воздействие напряжения обращается вспять. Напряженность поля, при которой эффект меняется на противоположный, называется критической интенсивностью Виллари, исходя из того факта, который впоследствии был установлен, что результат ранее был установлен Виллари в Италии. Не было обнаружено такого критического значения поля для стали, никеля или кобальта.

В некоторых экспериментах образец подвергался циклу магнитных изменений, и результаты регистрировались с помощью кривых. Они доказали, что при переходе из одного состояния в другое и возвращении материал отставал на своем обратном пути от соответствующих состояний на внешнем пути. Это явление, названное позже "гистерезисом" и детально

изученное Юингом и другими. Таким образом, магнитные работы Томсона послужили отправной точкой для многих более поздних исследований.

ГЛАВА IX

ГИДРОДИНАМИКА—ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРЕМА О МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ—ВИХРЕВОЕ ДВИЖЕНИЕ

Время от времени Томсон уделял большое внимание науке гидродинамике. Это, пожалуй, самый сложный предмет в области прикладной математики, и когда принимается во внимание вязкость (сопротивление трению при относительном движении частиц жидкости), она выходит за рамки ресурсов математической науки на ее нынешнем уровне развития. Но если полностью оставить в стороне вязкость и иметь дело только с так называемыми идеальными жидкостями, то трудности часто оказываются непреодолимыми. Долгое время единственным рассматриваемым видом движения жидкости было, за исключением нескольких простых случаев, то, что называется безвращательным движением. Это движение характеризуется аналитической особенностью, заключающейся в том, что скорость элемента жидкости в любом направлении представляет собой скорость изменения на единицу расстояния в этом направлении функции координат (расстояний, которые определяют положение) частицы. Это условие очень упрощает анализ; но когда оно не выполняется, нам приходится преодолевать гораздо более серьезные трудности. Тогда элементы жидкости испытывают то, что обычно, но совершенно неправильно, называется молекулярным вращением. Ибо мы мало знаем о молекулах жидкости; даже когда мы имеем дело с бесконечно малыми элементами, при анализе движения жидкости мы рассматриваем жидкость в массе. Но имеется в виду элементарное вращение, вращение бесконечно малых элементов по мере их движения. У нас есть пример такого движения в воздухе, когда колечко дыма выходит из трубы локомотива или с губ курильщика табака, в движении части жидкости, когда размешивают чай в чашке, вода ложкой с одной стороны на другую, или когда лопасть весла движется по воде. В этих последних двух случаях углубления, видимые на поверхности, являются концами вихря, который проходит между ними и заканчивается на поверхности. Во всех этих примерах образуется то, что было названо *вихрями*, и, следовательно, название вихревого движения было дано всем тем случаям, в которых условие безвихревости не выполняется.

Первая большая статья о вихревом движении была опубликована фон Гельмгольцем в 1858 году, а десять лет спустя мемуары Томсона на ту же тему были опубликованы в *Трудах Королевского общества Эдинбурга*. В этих мемуарах приведены гораздо более простые доказательства основных теорем фон Гельмгольца и, более того, некоторые новые теоремы, имеющие широкое применение к движению жидкостей. Одно из них настолько всеобъемлюще, что можно с уверенностью сказать, что оно содержит в себе всю динамику совершенной жидкости. Далее мы приводим содержание основных статей, насколько это возможно без введения анализа сложного описания.

В главе VI была сделана ссылка на "Заметки по гидродинамике", опубликованные Томсоном в *Кембриджском и Дублинском математическом журнале* за 1848 и 1849 годы. Эти заметки не

претендовали на то, чтобы быть полностью оригинальными, но были составлены для использования студентами, как и *Трактаты* Эйри пятнадцатилетней давности.

Первое примечание касалось уравнивания непрерывности, то есть математического выражения очевидного факта, что если рассматривать какую-либо область пространства в движущейся жидкости, то превышение скорости потока в пространство через ограничивающую поверхность над скоростью вытекания равно скорости роста количества жидкости в пространстве. Приведенное доказательство сейчас обычно повторяется в учебниках гидродинамики.

Во втором примечании обсуждалось условие, выполняемое на ограничивающей поверхности движущейся жидкости. Главным математическим результатом является уравнение, которое выражает факт, также очевидный без анализа, что поток жидкости по поверхности отсутствует. Другими словами, составляющая движения частицы жидкости в непосредственной близости от поверхности в любой момент времени, взятая в направлении, перпендикулярном поверхности, должна быть равна движению поверхности в этом направлении в тот же момент.

Третья заметка, опубликованная годом позже (февраль 1849 г.), имеет значительное научное значение. Она озаглавлена "О реальной жизни жидкости в движении". То, что раньше называлось "*vis viva*" тела, вдвое превышает то, что сейчас называется энергией движения, или кинетической энергией, тела. Термин "жидкость" - это всего лишь краткое обозначение жидкости, масса которой на единицу объема везде одинакова и не претерпевает никаких изменений. Более того, предполагается, что жидкость лишена трения, то есть относительным движениям ее частей не оказывает сопротивления касательная сила между ними. Главную доказанную и обсуждаемую теорему можно описать следующим образом.

Предполагается, что жидкость заполняет пространство внутри закрытой оболочки, которая удовлетворяет условию "просто непрерывности". Условие будет понято, если представить, что любые две точки A, B в пределах пространства соединены двумя линиями ACB, ADB , обе лежащие в пределах пространства. Эти две линии будут образовывать схему $ACBDA$. Если теперь эта схема, как бы она ни была нарисована, может быть сведена к точке без того, чтобы какая-либо часть схемы выходила за пределы пространства, условие выполнено. Очевидно, что пространство внутри поверхности анкерного кольца или кольца для занавеса не удовлетворяло бы этому условию, поскольку одна часть цепи могла бы проходить от A к B вокруг кольца в одну сторону, а другая от A к B в другую сторону. Тогда цепь не могла бы сузиться к какой-либо точке, не выйдя за пределы кольца.

Теперь пусть жидкость, находящаяся в состоянии покоя в таком пространстве, будет приведена в движение любым произвольно заданным изменением положения оболочки. Жидкость внутри будет приводиться в движение способом, полностью зависящим от движения оболочки. Можно представить себе другие движения жидкости, отличные от принятого, и все они согласуются с определенным движением поверхности. Теорема Томсона утверждает, что фактически совершаемое движение имеет меньшую кинетическую энергию, чем любое из других движений, которые имеют такое же движение ограничивающей поверхности.

Производимое движение обладает свойством, описываемым словом "безвращательный", то есть элементы жидкости не имеют вращательного движения — они движутся без вращения. Небольшая порция жидкости может описывать любую траекторию — например, двигаться по кругу — и при этом не вращаться. Читатель может представить себе мяч, который носится по

кругу, но таким образом, что ни одна линия в теле никогда не меняет своего направления. Тело перемещается, но не вращается.

Безвращательность жидкости обеспечивается, как указано выше, когда скорость каждого элемента в любом направлении равна скорости изменения на единицу расстояния в этом направлении определенной функции координат, расстояний, взятых параллельно трем прямым, перпендикулярным друг другу, и проведенных из точки, которые определяют положение частицы. Фактически, существует так называемый потенциал скорости, аналогичный потенциалу, описанному в главе IV выше, для электрического поля. Этого условия вместе с заданным движением поверхности достаточно для определения движения жидкости.

Томсон указал на два важных частных следствия: (1) движение жидкости в любой момент зависит исключительно от формы и движения ограничивающей поверхности и, следовательно, не зависит от предыдущего движения; и (2) если ограничивающую поверхность мгновенно привести в состояние покоя, жидкость во всем сосуде также мгновенно остановится.

Впоследствии эта теорема была обобщена Томсоном (*Протокол R.S.E.*, 1863) и применена к любой материальной системе связанных частиц, приводимых в движение с заданными скоростями одновременно и внезапно накладываемых в выбранных точках системы. Уже было известно, что кинетическая энергия системы тел, соединенных каким-либо образом и приводимых в движение импульсами, приложенными в определенных точках, была либо максимальной, либо минимальной по сравнению с кинетической энергией любого другого движения, совместимого с этими импульсами и со связями системы. Это было доказано Лагранжем в *Аналитической механике* как обобщение теоремы, данной Эйлером для твердого тела, приводимого во вращение импульсом.

Бертран доказал в 1842 году, что когда применяемые импульсы заданы в количестве и применяются в определенных точках, система запускается с кинетической энергией, большей, чем у любого другого движения, которое согласуется с заданными импульсами и связями системы. Это другое движение должно быть таким, которое могло бы быть произведено в системе заданными импульсами вместе с любым другим набором импульсов, способных в целом не выполнять никакой работы.

Теорема Томсона любопытным образом дополняет теорему Бертрана. Пусть на систему воздействуют импульсами, приложенными в определенных определенных точках, и никакими другими импульсами любого рода; и пусть импульсы будут такими, чтобы запускать эти выбранные точки с любыми предписанными скоростями. Система начнет движение с кинетической энергией, которая меньше, чем у любого другого движения, которое система могла бы осуществлять последовательно с заданными скоростями и которое она могла бы быть вынуждена принимать с помощью импульсов, которые в целом не производят никакой работы. В каждом случае разница энергий - это энергия движения, которая должна быть соединена с одним движением, чтобы дать другое, сопоставляемое с ним.

Простой пример, такой, какой можно было бы привести из частного случая, рассмотренного Эйлером, может помочь прояснить эти теоремы. Представьте себе прямой однородный стержень, лежащий на горизонтальном столе, между которым и стержнем нет трения. Пусть по стержню наносится удар одним концом в горизонтальном направлении под прямым углом к длине стержня. Если никакой другой импульс не подействует, конец стержня отойдет с

определенной скоростью, и другие части стержня (который предполагается идеально разгибающимся) будут приведены в действие соединениями системы. Очевидно, что можно представить любое количество других движений стержня, каждое из которых приводит к одному и тому же движению поражаемой конечности. Но на самом деле совершаемое движение заключается в повороте вокруг той точки стержня, которая находится на расстоянии двух третей длины от поражаемого конца. Если читатель рассмотрит кинетическую энергию для любого другого горизонтального поворотного движения, согласующегося с тем же движением конца, он обнаружит, что кинетическая энергия больше, чем у только что указанного движения. Это движение можно было бы произвести, приложив к точке, вокруг которой поворачивается стержень, импульс, необходимый для удержания этой точки в состоянии покоя. Приложенный таким образом импульс не произвел бы никакой работы. Фактическое значение равно $\frac{1}{8}mv^2$, где m обозначает массу стержня, а v - скорость конца. Если бы предпринятое движение представляло собой вращение вокруг точки стержня на расстоянии x от пораженного конца, кинетическая энергия составляла бы $m(4l^2 - 6lx + 3x^2)v^2/6x^2$, где $2l$ - длина стержня, и она имеет наименьшее значение $\frac{1}{8}mv^2$ для $x = 4l/3$. Например, $x = 2l$ дает $\frac{1}{6}mv^2$, что равно больше только что найденного значения.

Возможно, понять теорему Бертрана, примененную к этому случаю движения, не так-то просто. Движение, о котором говорят, что оно обладает максимальной энергией, - это движение, заданное определенным импульсом в конце удара, и это, при отсутствии каких-либо других импульсов, было бы движением с минимальной энергией. Но пусть альтернативное движение, которое следует сравнить с тем, которое было предпринято на самом деле, будет ограничено дополнительными импульсами, которые в совокупности не могут произвести никакой работы, и существование максимума будет учтено. Полученная кинетическая энергия равна половине произведения импульса на скорость пораженной точки, то есть $\frac{1}{2}lv$, и только что было видно, что это произведение $\frac{1}{6}mv^2$ на коэффициент $(4l^2 - 6lx + 3x^2)/x^2$. Этот коэффициент равен $3l/mv$ и является минимальным при $x = 4l/3$. Таким образом, для данного l , v будет иметь максимальное значение, когда указанный коэффициент будет наименьшим, и тогда $\frac{1}{2}lv$ будет максимальным.

Стержень может поворачиваться вокруг другой точки с помощью неподвижного шарнира, расположенного там. Одновременно с ударом к стержню шарниром будет приложен импульс; и очевидно, что этот импульс не действует, поскольку не происходит смещения точки, к которой он приложен.

Две теоремы являются следствиями одного принципа. Ограничение в каждом случае увеличивает то, что можно назвать эффективной инерцией, которую можно принять за l/v . Таким образом, когда задано v , l увеличивается за счет любого ограничения, заставляющего стержень вращаться вокруг определенной оси, и, таким образом, увеличивается $\frac{1}{2}lv$, или кинетическая энергия. С другой стороны, когда задается l , то же самое ограничение уменьшает v , и, таким образом, уменьшается $\frac{1}{2}lv$.

В короткой статье, опубликованной в Отчете В. А. за 1852 год, указывается, что силовые линии вблизи небольшого магнита, расположенного своей осью вдоль силовых линий в однородном магнитном поле, поскольку он находился бы в состоянии покоя под действием поля, находятся в соответствующих точках, аналогичных точкам поля изолированного сферического проводника, находящегося под индуктивным влиянием отдаленного изменения электрического напряжения. Далее, отмечается тот факт, что, если магнит направлен противоположно полю, силовые линии

искривляются наружу, точно так же, как линии течения однородного потока были бы у сферического препятствия, на поверхности которого не возникало вихрей. Это одна из тех поучительных аналогий между теорией движения жидкости и другими теориями, включающими совершенно аналогичные фундаментальные идеи, на которые любил указывать Томсон и которые помогали ему в его неоднократных попытках представить механические представления физических явлений различного рода.

К ним можно добавить еще один, на котором он часто останавливался в лекциях — так называемый простой дублет, состоящий из точечного источника жидкости и равного и близко прилегающего точечного стока. Реализацией этого устройства может служить короткая трубка с бесконечной массой жидкости, которая непрерывно втекает с одного конца и выходит с другого. Линии потока снаружи трубки в точности аналогичны силовым линиям небольшого магнита; и если в то же время существует равномерный поток жидкости в направлении длины трубки, поле потока будет точной картиной силового поля небольшого магнита, когда он расположен по своей длине вдоль линий ранее существовавшего однородного поля. Поток в дублете будет совпадать с общим потоком или против него в зависимости от того, направлен магнит вместе с полем или против него.

Выше была сделана ссылка на статью о вихревом движении, и дано указание на природу движения жидкости, описанного в этом названии. Существуют, однако, два случая движения жидкости, которые называются вихрями, хотя фундаментальный критерий вихревого движения — отсутствие потенциала скорости — удовлетворяется только в одном из них. Демонстрация одного из них была любимым экспериментом Томсона на обычных лекциях, как, вероятно, помнят его старые студенты. Если воду в большой миске быстро размешать чайной ложкой, которую водят круг за кругом вокруг оси миски, поверхность станет вогнутой, а форма центральной части будет представлять собой параболоид вращения относительно вертикали через самую нижнюю точку, то есть любой участок этой части поверхности, образованный вертикальной плоскостью, содержащей ось, будет представлять собой параболу, симметричную относительно оси. Движение можно лучше обеспечить, установив сосуд на вращающийся стол и вращая его вокруг вертикальной оси, совпадающей с осью его фигуры; но явление можно довольно хорошо разглядеть и без этого механизма. В этом случае скорость каждой частицы воды пропорциональна ее расстоянию от оси, и вся масса, когда устанавливается относительное равновесие, вращается, как если бы она была жесткой, вокруг оси сосуда. Каждый элемент жидкости в этом "вынужденном вихре", как его называют, находится во вращении и, подобно Луне, совершает один оборот за один оборот вокруг центра своего пути. Таким образом, это истинный, хотя и очень простой случай вихревого движения.

С другой стороны, может существовать то, что можно назвать "свободным вихрем", и иногда это приблизительно похоже на то, когда воде в сосуде позволяют стекать через выпускную трубу на дне. Скорость элемента в этом "вихре" обратно пропорциональна его расстоянию от центра, а форма свободной поверхности сильно отличается от формы в другом случае. Этому случаю движения часто дают название "свободный вихрь", но в нем вообще нет никакого вихревого движения.

Великая статья Томсона о вихревом движении была прочитана в Королевском обществе Эдинбурга в 1867 году и была переработана и дополнена в следующем году. Здесь можно будет дать лишь общее представление о его масштабах и основных результатах.

Предполагается, что жидкость содержится в закрытом неподвижном сосуде, который является либо просто, либо многократно непрерывным (см. стр. 156) и может содержать погруженные в него простые или многократно непрерывные твердые частицы. Когда эти твердые частицы существуют, их поверхности являются частью границы жидкости; они окружены жидкостью, если только они где-либо не соприкасаются с содержащим сосудом, и предполагается, что их плотность такая же, как у жидкости. На них могут воздействовать силы извне, и они воздействуют на жидкость силами давления и друг на друга либо непосредственно, либо через жидкость.

Первый полученный результат довольно очевиден. Центр масс всей системы должен оставаться в состоянии покоя, какие бы внешние силы ни воздействовали на твердые тела, поскольку плотность везде внутри сосуда одинакова, а сосуд неподвижен; иными словами, содержимое сосуда не движется ни в каком направлении. Ибо любое движение твердых тел, вызванное внешними силами, должно сопровождаться движением жидкости, равным и противоположным в указанном здесь смысле.

После обсуждения того, что он называет импульсом движения, представляющим собой систему импульсных сил, действующих на подвижные твердые тела, которые порождают движение из состояния покоя, Томсон переходит к доказательству важного утверждения о том, что вращательное движение каждой части жидкой массы, если оно равно нулю в любой момент для каждой части массы, всегда остается равным нулю. Это делается путем рассмотрения углового момента любой небольшой сферической части жидкости относительно оси, проходящей через центр сферы, и доказательства того, что для того, чтобы он мог обратиться в нуль, для каждой оси составляющие скорости жидкости в центре должны быть выведены из потенциала скорости. Угловой момент частицы относительно оси равен произведению составляющей импульса частицы, расположенной под прямым углом к плоскости, проходящей через частицу и ось, на расстояние частицы от оси. Сумма всех таких произведений для частиц, составляющих тело (при надлежащем учете знаков в соответствии с направлением поворота вокруг оси), представляет собой угловой момент. Принятое доказательство этого результата принадлежит Стоксу. Угловых скоростей элементов жидкости в точке X, Y, Z , О осям X, Y, Z и показывает $\frac{1}{2} (\partial J / \partial Y - \partial C / \partial Z)$ и т. д.

Таким образом, было показано, что это условие является необходимым; оставалось доказать, что оно является достаточным. Это сразу становится очевидным из определения потенциала скорости, который теперь должен предполагаться существующим, чтобы можно было доказать его достаточность. Если в качестве оси принять любой диаметр сферической части и рассмотреть любую плоскость, проходящую через эту ось, скорость частицы под прямым углом к этой плоскости можно сразу выразить как скорость, с которой потенциал скорости изменяется на единицу расстояния вдоль окружности, симметричной относительно оси, на которой лежит частица. Интеграл от потенциала скорости по этой окружности обращается в нуль, и поэтому угловой момент для любого тонкого однородного кольца частиц вокруг оси также обращается в нуль, а поскольку сфера состоит из таких колец, весь угловой момент равен нулю. Таким образом, условие является достаточным.

Затем Томсон доказывает, что если рассматриваемый таким образом угловой момент равен нулю для каждой порции жидкости в любой момент времени, то он остается равным нулю в каждый последующий момент; то есть никакое физическое действие вообще не могло бы

создать угловой момент внутри жидкости, которая, следует помнить, должна быть лишена трения. Приведенное здесь доказательство не может быть набросано в общих чертах, поскольку оно зависит от дифференциального уравнения непрерывности, которому удовлетворяет соотношение скорости и потенциала во всей жидкости (фактически того же дифференциального уравнения, которому удовлетворяет распределение температуры в однородной проводящей среде в стационарном состоянии), и последующего выражения этой функции для любого сферического пространства в жидкости в виде ряда сферических гармонических функций. Для читателя, которому известны свойства этих функций, этот процесс не может представить никаких трудностей.

Далее в статье приводится совершенно иное доказательство этого утверждения, основанное на новой и очень общей теореме, которая была описана как содержащая почти всю теорию движения жидкости. Это зависит от того, что Томсон назвал потоком по любому пути, соединяющему любые две точки P, Q в жидкости. Пусть q - скорость жидкости на любом элементе длины ds такого пути, а θ - угол между направлением ds (принимаемым положительным в смысле от P до Q) и направлением q : $q \cos \theta$. ds - поток вдоль ds . Если u, v, w быть компонентами q в ds , параллельными осям, а dx, dy, dz быть проекциями ds на оси, то $u dx + v dy + w dz$ - это то же самое, что $q \cos \theta \cdot ds$. Сумма значений любого из этих выражений для всех элементов пути между P и Q представляет собой поток по пути. Утверждение о том, что u, v, w - это пространственные скорости изменения функции ϕ (от x, y, z), параллельные осям, или что $q \cos \theta$ - это пространственная скорость изменения ϕ вдоль ds , просто означает, что эта сумма одинакова для любого пути, который может быть проведен от P к Q . Это, однако, имеет место только в том случае, когда траектории выбраны таким образом, что в каждом случае значение ϕ возвращается после изменения по замкнутому пути к значению, которое оно имело в начальной точке, то есть замкнутый путь должен быть способен сжиматься до точки, не выходя за пределы пространства, занятого безвозвратно движущейся жидкостью.

Поскольку поток от P к Q одинаков для любых двух путей, удовлетворяющих этому условию, поток от P к Q по любому одному пути и от Q к P по любому другому должен быть равен нулю. Поток по такому замкнутому пути не равен нулю, если условие не выполняется, и его значение было названо Томсоном циркуляцией по пути.

Теперь можно сформулировать общую теорему, которую он установил. Рассмотрим любой путь, соединяющий PQ и движущийся вместе с жидкостью, так что линия всегда содержит одни и те же частицы жидкости. Пусть u, v, w - временные показатели изменения u, v, w в элементе ds пути в любой момент времени, и du, dv, dw превышения значений u, v, w на конечном конце ds выше значений на другом конце; тогда время - скорость изменения $u dx + v dy + w dz$ is $u \dot{dx} + v \dot{dy} + w \dot{dz} + u du + v dv + w dw$ или $u \dot{dx} + v \dot{dy} + w \dot{dz} + q dq$, где q имеет значение, указанное выше. Таким образом, если S - поток для всего пути PQ и $\dot{S}$ его темп изменения во времени, то S' обозначает сумму $u \dot{dx} + v \dot{dy} + w \dot{dz}$ вдоль пути от P к Q , и q_1, q_0 результирующих скоростей жидкости при Q и P , получаем $\dot{S} = S' + \frac{1}{2}(q_1^2 - q_0^2)$. Это теорема Томсона. Если кривая замкнута, то есть, если P и Q совпадают, то $q_1 = q_0$ и $\dot{S} = S'$. Но при определенных обстоятельствах S' равно нулю, а следовательно, также $\dot{S}$. Таким образом, в упомянутых обстоятельствах, поскольку замкнутый контур движется вместе с жидкостью, $\dot{S}$ постоянно равно нулю, и из этого следует, что если $\dot{S}$ равно нулю в любой момент, то оно остается равным нулю всегда. Но $\dot{S}$ равно нулю только в том случае, если u, v, w выводимы из потенциала, однозначного в пространстве, в котором нарисован замкнутый путь, так что путь можно сжать до точки, никогда не выходя за пределы

такого пространства. В идеальной жидкости, если это условие однажды выполнено для замкнутой кривой, движущейся вместе с жидкостью, оно выполняется для этой кривой всегда.

Обстоятельства, при которых S' равно нулю, таковы: —внешняя сила на единицу массы, действующая на жидкость в любой точке, должна быть выведена из потенциальной функции, а плотность жидкости должна быть функцией давления (также функцией координат); и эти функции должны быть такими, чтобы S' всегда равнялась нулю для замкнутого пути. Это условие явно выполняется во многих важных случаях; например, силы выводятся из потенциала, обусловленного действиями, такими как сила тяжести, происхождение которой является внешним по отношению к жидкости; а плотность является функцией давления (в данном случае это постоянная величина), так что часть S' , которая зависит от давления и плотности, обращается в нуль для контура.

Следует четко понимать, что движение жидкости может быть безвозвратным, хотя значение S не обращается в нуль для *каждой* замкнутой траектории, которую можно провести по ней. Жидкость может занимать многократно непрерывное пространство, и траектория может быть нарисована, а может и не быть такой, чтобы S была равна нулю; но что необходимо для безвозвратного движения в любом пространстве, так это то, что S должна быть равна нулю для всех траекторий, которые можно сжать до нуля, не выходя за пределы этого пространства. S необязательно должно быть равно нулю для пути, который нельзя так уменьшить, но оно должно, если выполняется только что указанное условие, иметь одинаковое значение для любых двух путей, один из которых можно заставить перейти в другой путем изменения положения, никогда не выходя полностью или частично за пределы пространства. Потенциал всегда однозначен в жидкости, заполняющей единично непрерывное пространство, например, внутри сферической оболочки или между двумя концентрическими оболочками; внутри полого анкерного кольца потенциал, хотя он и существует, а движение безвозвратное, не однозначен. В последнем случае движение называется *циклическим*, в первом - *ациклическим*.

Из этой теоремы выводится ряд следствий; и из них непосредственно вытекают свойства вихрей, которые ранее были открыты фон Гельмгольцем. Сначала возьмите любую поверхность, которая имеет в качестве ограничивающей кромки замкнутую кривую, нарисованную в жидкости, и проведите от любого элемента этой поверхности площадью dS линию, перпендикулярную поверхности, к стороне, выбранной в качестве положительной стороны, и вычислите угловую скорость ω , скажем, жидкости относительно этой нормали, исходя из составляющих угловой скорости, определенных способом, описанным на стр. 164. Это Томсон назвал *вращением* элемента. Теперь возьмите продукт ωdS для поверхностного элемента. Легко видеть, что это равно половине оборота вокруг ограничивающего края элемента. По мере перемещения жидкости, составляющей элемент, площадь dS может изменяться, но циркуляция вокруг его края по теореме Томсона остается неизменной. Таким образом, ω изменяется обратно пропорционально dS , и линия, проведенная под прямым углом к поверхности в точке dS , если сохранять длину, пропорциональную ω , будет удлиняться или укорачиваться по мере того, как dS сжимается или расширяется.

Теперь суммируйте значения ωdS для конечной поверхности, ограниченной ограничивающей кривой. Из факта, что ωdS равна половине оборота вокруг края dS , следует, что эта сумма, которая обычно обозначается через $\sum \omega dS$, равна половине оборота вокруг замкнутой кривой, образующей край поверхности. Кроме того, при движении жидкости циркуляция вокруг кромки

остаётся неизменной, и, следовательно, то же самое происходит и с $\sum \omega dS$ для окружающих её элементов. Важно отметить, что эта сумма, определяемая циркуляцией на ограничивающей кривой, одинакова для всех поверхностей, имеющих одну и ту же границу.

Равенство $2\sum \omega dS$ для поверхности обращению вокруг её края было выражено Томсоном как аналитическая теорема интегрирования, которая впервые была дана Стоксом в работе на премию Смита, опубликованной в 1854 году. Здесь указано, по-видимому, по недосмотру, что впервые это было дано в *Натурфилософии* Томсона и Тейта, § 190. Во втором издании *Натурфилософии* теорема приписывается Стоксу. Сейчас она хорошо известна как теорема Стокса, соединяющая определённый поверхностный интеграл с линейным интегралом, и имеет множество приложений как в физике, так и в геометрии.

Теперь рассмотрим результирующую угловую скорость в любой точке жидкости и проведём короткую линию через эту точку в направлении оси вращения. Эта линия может быть продолжена от точки к точке и будет совпадать в каждой из своих точек с направлением оси вращения там. Такая осевая кривая, как её можно было бы назвать, явно движется вместе с жидкостью. Возьмём любую бесконечно малую область, содержащую элемент линии; циркуляция вокруг края этой области равна нулю, поскольку нет вращения вокруг линии, перпендикулярной этой области. Следовательно, циркуляция вдоль осевой кривой равна нулю, и осевые кривые движутся вместе с жидкостью.

Возьмём теперь любую небольшую плоскую область dS , движущуюся вместе с жидкостью, и проведём осевые линии через каждую точку её границы. Они образуют осевую трубу, охватывающую dS . Если θ - угол между направлением результирующего вращения и перпендикуляром к dS , то поперечное сечение трубы под прямым углом к нормали и к ограничивающим её осевым линиям равно $dS \cdot \cos \theta$. Пусть эти осевые линии продолжаются в обоих направлениях от элемента dS . Они будут охватывать трубу переменного нормального поперечного сечения; но произведение вращения на площадь нормального поперечного сечения везде имеет одинаковое значение. Вихревая трубка с жидкостью внутри неё называется вихревой нитью накала.

Будет видно, что эта вихревая труба должна быть бесконечной, то есть она должна либо возвращаться в саму себя, либо быть бесконечно длинной в одном или обоих направлениях. Ибо, если бы он заканчивался где-либо внутри жидкости, можно было бы сформировать поверхность, начиная с замкнутого контура вокруг трубки, продолжающуюся вдоль поверхности трубки до конца, а затем закрывающуюся колпачком, расположенным за концом. Ни на одной части этой поверхности не было бы никакого вращения, и $\sum \omega dS$, равное циркуляции, было бы для неё равно нулю; и, конечно, этого не может быть. Таким образом, трубка не может заканчиваться внутри жидкости. Однако он может иметь оба конца на поверхности или один на ограничивающей поверхности, а другой на бесконечности, если жидкость бесконечно вытянута в одном направлении, но в этом случае окончание только кажущееся. Разрез расширен на поверхности; некоторые из ограничивающих линий проходят до другого видимого конца, когда он также лежит на поверхности, в то время как другие линии уходят в бесконечность вдоль поверхности и соответствуют другим линиям, идущим из бесконечности к другому концу. Независимо от того, бесконечна поверхность или нет, вихрь образует так называемый вихревой слой, то есть поверхность, по обе стороны от которой жидкость движется с разными тангенциальными скоростями.

Через вихревое кольцо или трубку жидкость циркулирует по замкнутым линиям потока, каждая из которых проходит через трубку. Циркуляция по каждой линии потока, охватывающей одну и ту же систему вихревых труб, имеет одинаковую величину.

Если нарисовать какую-либо поверхность, разрезающую вихревую трубу, то из определения трубы ясно, что значение $\sum w dS$ для каждой такой поверхности должно быть одинаковым. Это Томсон называет "вращением трубки".

Как впервые указал фон Гельмгольц, вихревые нити соответствуют контурам, по которым токи и скорость в окружающей жидкости зависят от напряженности магнитного поля. "Вращение трубки" соответствует силе тока, который возникает и опускается к положительному и отрицательному магнитным полюсам. Томсон широко использовал эту аналогию в своих работах по электромагнетизму.

Примеры вихревых трубок приведены на стр. 154; и читатель может поэкспериментировать с вихрями в жидкостях с водой в чайной чашке или в реке или пруду, когда ему заблагорассудится. Воздушные вихри могут быть экспериментально изучены с помощью простого прибора, разработанного профессором Тейтом, который может быть сконструирован кем угодно.

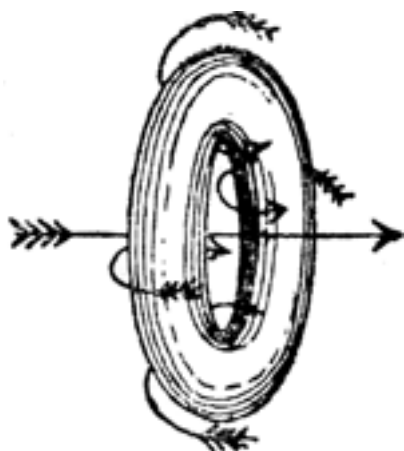


Рис. 13.

В одном конце упаковочной коробки, примерно 2 фута в длину и 18 дюймов в ширину. 18 дюймов в ширину. глубоко вырезается круглое отверстие, а края отверстия утончаются до тупого края. По желанию его можно закрыть куском доски. Противоположный конец снимается, и лист холста туго натягивается на его место и прикрепляется к концам бортов. Через два отверстия, просверленных в одной из сторон, в коробку входят горлышки двух колб с загнутыми горлышками. В одной из этих колб содержится аммиак, в другой - соляная кислота. Когда отверстие с одного конца закрывается пластинкой из жести, а жидкости нагреваются спиртовкой, пары образуют внутри коробки облако нашатырного спирта, которое задерживается во время его образования. Затем отверстие открывается, и по холсту ловко ударяют открытой ладонью. Сразу же появляется красивое кольцо дыма, четкое, как твердое тело, и движется по комнате. (См. рис. 13.) Конечно, это воздушное кольцо, видимое благодаря поднимающемуся с ним дыму. Изменяя форму отверстия — например, используя вместо

отверстия, вырезанного в дереве, пластину из жести с вырезанным в ней эллиптическим отверстием, — вихревые кольца можно настраивать на вибрацию по мере их создания и изучать вибрации при движении вихря.

Еще более красивые вихри можно создавать в воде, используя длинный резервуар с чистой водой вместо воздуха, в котором движется вихрь, и отделение с одного конца, заполненное водой, окрашенной анилином, вместо коптилки. Отверстие в разделительной перегородке позволяет формировать вихрь, а поршневое устройство, установленное на противоположной стороне, позволяет подавать импульс к воде извне.

Из приведенного выше описания природы вихревого движения будет ясно, что вихри в идеальной жидкости, однажды возникшие, должны существовать всегда. Создать вихрь внутри массы безвращательно движущейся идеальной жидкости физически невозможно. Поэтому Томсону пришло в голову, что обычная материя может быть частицами совершенной жидкости, заполняющей все пространство и отличающейся от окружающей жидкости вращением, которым они обладают. Такая материя соответствовала бы закону сохранения, поскольку она не могла быть ни создана, ни уничтожена каким-либо физическим действием.

Результаты таких экспериментов привели Томсона к созданию его знаменитой вихревой атомной теории вещества, теории, однако, которая, по его мнению, в конечном итоге была сопряжена с таким количеством трудностей, что казалась неосуществимой.

В статье о вихревом движении также рассматривается модификация знаменитой аналитической теоремы Грина, которая, как указал Гельмгольц, была необходима для адаптации ее к пространству, которое является многократно непрерывным. Теорема связывает определенный объемный интеграл, взятый по замкнутому пространству, с интегралом, взятым по ограничивающей поверхности пространства. Это вытекает из отмеченного выше факта, что в многократно непрерывном пространстве (например, пространстве внутри бесконечной трубки) функции, которые являются предметом интегрирования, не могут быть однозначными. Такой функцией была бы скорость-потенциал для жидкости, циркулирующей по трубе, — циклическое движение, как это назвал Томсон. Если в такой трубе провести замкнутый контур любой формы, начинающийся с точки P и удваивающийся назад, чтобы вернуться к P без огибания трубы, потенциал скорости будет меняться вдоль трубы, но, наконец, вернется к своему первоначальному значению при достижении начальной точки. И циркуляция по этому контуру будет равна нулю. Но если замкнутый контур образует контур трубы, потенциал скорости будет непрерывно изменяться вдоль контура, пока, наконец, когда P is reached again, the value of the function is greater (or less) than the value assumed for the starting point, by a certain definite amount which is the same for „каждого контура пространства. Если траекторию провести дважды по кругу в одном и том же направлении, изменение функции будет вдвое больше, и так далее. Пространство внутри одной бесконечной трубы, такой как анкерное кольцо, является вдвойне непрерывным; но можно представить гораздо более сложные случаи. Например, анкерное кольцо с поперечной соединительной трубкой с одной стороны на другую было бы тройным непрерывным.

Томсон показал, что правильная модификация теоремы получается путем представления диафрагм, расположенных поперек пространства, которые не должны пересекаться никаким замкнутым путем, проведенным внутри пространства, и две поверхности каждой из которых следует рассматривать как часть ограничивающей поверхности пространства. Одной такой

диафрагмы достаточно для преобразования полого анкерного кольца в единое непрерывное пространство, для полого анкерного кольца с поперечным соединением потребовались бы две и так далее. Требуемое количество диафрагм всегда на единицу меньше, чем степень кратности непрерывности.

В статье также рассматривается движение твердых тел в жидкости и аналогичные движения вихревых колец и их притяжение обычной материей. Их можно изучить с помощью вихревых колец в воздухе, создаваемых аппаратом, описанным выше. Такое кольцо, сделанное так, чтобы проходить через входящий угол стены — например, край оконной ниши, - будет казаться притянутым. Большая сфера, такая как большой земной шар, также очень хорошо служит притягивающим телом.

Два вихревых кольца, проецируемых одно за другим, также действуют друг на друга очень любопытным образом. Их плоскости перпендикулярны направлению движения, и жидкость движется вокруг круглой сердцевины кольца. Происходит безвращательное циклическое движение жидкости через кольцо в одном направлении и обратно наружу, как показано на рис. 13, которое можно обнаружить, поместив пламя свечи на пути к центру. Первое кольцо, вследствие существования того, которое следует за ним, движется медленнее и раскрывается шире, следующее кольцо ускоряет свое движение и уменьшается в диаметре, пока, наконец, не догонит первое и не проникнет в него. Как только он прошел через это, он продвигается вперед все медленнее и медленнее, пока тот, кто остался позади, не начинает догонять его, и повторяются изменения, которые произошли ранее. Проникающий, в свою очередь, становится проникшим, и так далее поочередно. Однако для успеха этого интересного эксперимента необходимы большая осторожность и мастерство.

У нас нет места рассматривать здесь другие гидродинамические исследования, такие как вклад, который Томсон внес в обсуждение многих сложных проблем движения твердых тел в жидкости, или его очень многочисленные и важные вклады в теорию волн. О количестве и важности его работ по гидродинамике можно судить по тому факту, что в последнем издании "*Гидродинамики*" Лэмба содержится не менее пятидесяти двух ссылок на его работы и тридцать пять на "*Натурфилософию*" Томсона и Тейта, и что многие из них касаются общих теорем и результатов, имеющих большую ценность.

ГЛАВА X

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА—ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ— ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Электролизные и электрические установки

В декабре 1851 года Томсон опубликовал в *Philosophical Magazine* важную статью "Механическая теория электролиза" и "Применение механического воздействия для измерения электродвижущих сил и гальванических сопротивлений в абсолютных единицах".

В первом из них он предположил, что машина, подобная той, которую представлял Фарадей, состоит из металлического диска, равномерно вращающегося своей плоскостью под прямым

углом к силовым линиям однородного магнитного поля и соприкасающегося в центре и по окружности неподвижными проводами, пропускает ток через электрохимический аппарат, к которому подсоединены провода. Предполагалось, что за определенное время должно было быть затрачено определенное количество работы Wt , в течение которого в контуре выделялось определенное количество тепла H , и определенное количество работы M , затраченное в химическом аппарате на осуществление химических изменений. Если H выражать в динамических единицах, то $W=H+M$.

Работа, выполняемая при вращении диска, при напряженности поля I , вырабатываемом токе c , радиусе диска r и угловой скорости поворота w , составляет $\frac{1}{2}Ir^2cw$.

Томсон предположил, что работа, выполняемая в электрохимическом аппарате, равна теплоте химического соединения вещества или веществ, подвергшихся химическому воздействию, с соответствующим знаком в соответствии с изменением, если воздействовало больше сложных веществ, чем одно. Следовательно, M представляло собой эту результирующую теплоту сочетания.

Электрохимический аппарат представлял собой вольтметр, содержащий определенное соединение, подлежащее электролизу, или гальванический элемент или батарею. А из экспериментов Фарадея по электролизу было известно, что степень химического воздействия пропорциональна общему количеству электричества, прошедшему через элемент за данное время, так что скорость, с которой энергия расходовалась в элементе, в любой момент была пропорциональна току в этот момент.

Химическое изменение можно было бы измерить, рассматривая только один из элементов, высвобождаемых или соединяемых при прохождении тока, и учитывая количество тепла, θ , скажем, для всего химического изменения в ячейке, соответствующего воздействию на единицу массы этого элемента. Таким образом, если E обозначить все количество этого элемента, на которое воздействовала теплота соединения в сосуде, было θe . Если E принять за единицу времени, а ϵ обозначить величину, высвобождаемую при пропускании единичного количества электроэнергии, то $E=\epsilon c$, поскольку ток передает c единиц электроэнергии за одну секунду. Число ϵ является определенным количеством элемента и называется его электрохимическим эквивалентом. Опять же, из экспериментов Джоуля, $H=Rc^2$, если R обозначает сопротивление тока, и поэтому

$$\frac{1}{2}Ir^2cw = Rc^2 + \theta\epsilon c$$

и

$$C = \frac{\frac{1}{2} I r^2 \omega - \theta \epsilon}{R}$$

Величина $\frac{1}{2} I r^2 \omega$ представляет собой электродвижущую силу, создаваемую диском.

Таким образом, с положительным или отрицательным в зависимости $\frac{1}{2} I K^{-2} \omega$ было больше или меньше $\theta \epsilon$, и нулю, когда $\frac{1}{2} I K^{-2} \omega = \theta \epsilon$. Таким образом, электродвижущей силе диска противостояла обратная электродвижущая сила $\theta \epsilon$ из-за химического воздействия в вольтамetre или батарее, к которым были подключены провода от диска.

Таким образом, был сделан вывод, что электродвижущая сила (или, как ее тогда называли, интенсивность) электрохимического воздействия была равна динамической величине всего химического изменения, произведенного током единичной силы за единицу времени.

Исходя из этого результата, Томсон приступил к расчету электродвижущих сил, необходимых для осуществления химических изменений различного рода, а также для различных типов гальванических элементов. Предположив, что единица электричества переносится током через элемент, он рассмотрел химические изменения, сопровождавшие его прохождение, и на основе известных значений теплоты соединения рассчитал их энергетические значения. В некоторых частях изменение было вызвано химическим соединением, в других - разложением материалов, и необходимо было обращать внимание на знак теплового эквивалента. Путем правильного суммирования всех тепловых эквивалентов была получена чистая сумма, которая, согласно Томсону, представляла собой энергию, потребляемую при прохождении единичного тока, и, следовательно, была электродвижущей силой. Теория была неполной и требовала дополнения термодинамической теорией, которая показывает, что помимо электродвижущей силы в величину, установленную относительно суммы теплотерм, должен быть включен член, представленный произведением абсолютной температуры, умноженным на скорость изменения электродвижущей силы при изменении температуры. Таким образом, теория применима только тогда, когда изменение температуры не влияет на электродвижущую силу. Указанное здесь необходимое дополнение было сделано Гельмгольцем.

В следующей статье, появившейся в том же номере (декабрь 1851 г.) *Philosophical Magazine*, принцип работы применяется для измерения электродвижущих сил и сопротивлений в абсолютных единицах. Преимущества таких агрегатов очевидны. Почти вся количественная работа старых экспериментаторов была бесполезна, за исключением тех, кто действительно проводил наблюдения: вряд ли один человек мог продвигать свои исследования, используя данные, полученные другими. Ибо результаты были выражены ссылкой на аппаратуру и материалы, имевшиеся в распоряжении наблюдателей, и к ним другие могли получить доступ только с большим трудом и за большие деньги, не говоря уже о неопределенности сравнений,

сделанных для того, чтобы результаты одного человека могли быть связаны с результатами, полученными другим человеком в другом месте, и с другим оборудованием, другим человеком. Поэтому было крайне важно получить абсолютные единицы измерения — единицы, не зависящие от места происхождения и оборудования, — для выражения токов, электродвижущих сил и сопротивлений, чтобы результаты экспериментов по всему миру были доступны каждому, кто прочтет опубликованный отчет. (См. Главу [XIII](#).)

Магнитоэлектрическая машина, представленная в предыдущей статье, давала возможность оценить электродвижущую силу элемента или батареи в абсолютных единицах. Здесь используется машина того же типа, но в более простой форме скользящего провода, соединяющего пару изолированных рельсов, проложенных плоскостью, перпендикулярной силовым линиям однородного магнитного поля. Если направляющие соединить проволокой, а ползунок переместить так, чтобы он пересекал силовые линии, в цепи возникнет ток. Ток может быть измерен в терминах уже известной единицы измерения тока, того тока, который протекает по окружности радиусом в единицу, создавая магнитное поле в центре в 2π единиц. Этот ток, c , скажем, по силе, протекающий в цепи, создает динамическую силу, cIl необходимую для перемещения ползунка длиной l поперек силовых линий поля напряженности I , и если скорость ползунка, необходимая для тока, c равна v , скорость, с которой выполняется работа по перемещению ползунка, равна $cIlv$. Это должна быть скорость, с которой работа выполняется в цепи током, и если единственная выполняемая работа заключается в нагреве проводника, мы имеем $cIlv = Rc^2$, или $Ilv = Rc$, так что Ilv - электродвижущая сила. Любая возникающая иным образом электродвижущая сила, которая приводит к возникновению того же тока, очевидно, должна быть равна Ilv , чтобы таким образом можно было правильно определить единицу электродвижущей силы.

Томсон использовал систему единиц измерения "фут-зернистость-секунда"; но из этого расположения теперь получаются CGS-единицы электродвижущей силы и сопротивления. Если I равно единице CGS, l - одному сантиметру и v - одному сантиметру в секунду, мы имеем единичную электродвижущую силу в системе CGS. Также в одной единице сопротивления CGS, если c равно единице, а также Ilv .

Идея определения сопротивления в абсолютных единицах на основе правильных принципов возникла благодаря У. Вебер, который также дал методы проведения измерений; а первое определение было сделано Кирхгофом в 1849 году. Однако Томсон, по-видимому, был первым, кто обсудил вопрос о единицах измерения с точки зрения энергии. Этот способ рассмотрения вопроса важен, поскольку абсолютные единицы измерения выбраны таким образом, чтобы позволить учитывать работу, совершаемую электрическими и магнитными силами, в обычных динамических единицах. С тех пор на определение устойчивости было потрачено огромное количество экспериментальных ресурсов и навыков, хотя и не больше, чем того требовала важность предмета. Нам придется вернуться к этому вопросу при рассмотрении работы Британской ассоциации электротехнических стандартов, активным членом которой Томсон долгое время был.

Электрические колебания

В своем знаменитом трактате "О сохранении энергии", опубликованном в 1847 году, фон Гельмгольц обсудил некоторые загадочные результаты, полученные Риссом при намагничивании железных проволок током лейденского баночного разряда, протекающего в

окружающей их катушке, и факт, наблюдаемый Волластоном, что при разложении воды лейденскими баночными разрядами на каждом электроде появляется смесь кислорода и водорода, и предположил, что, возможно, разряд носил колебательный характер.

В 1853 году этот вопрос математически обсуждался Томсоном в статье, которая оказалась плодотворной в наше время способом, которого тогда мало кто ожидал. Допустим, банка подается с положительным зарядом внутреннего покрытия и отрицательным зарядом внешнего покрытия. Катушка или спираль из проволоки своими концами соединена с двумя покрытиями, и в проволоке немедленно начинается ток, сила которого постепенно (не медленно) увеличивается. Создание тока сопровождается созданием магнитного поля, то есть окружающее пространство становится очагом магнитного воздействия. Магнитное поле, как мы увидим из другого исследования Томсона, почти наверняка включает движение в среде — эфире, — заполняющем пространство, где обнаружено магнитное воздействие. Заряд банки состоит из состояния интенсивного и специфического напряжения в стеклянной пластине между покрытиями. Когда пластины соединяются катушкой, это состояние напряжения разрушается, и возникает движение в среде, причем не только между пластинами, но и в окружающем пространстве — фактически, во всем поле. Этому движению, которое не следует путать с телесным перемещением конечных частей среды, противостоит нечто сродни инерции среды (свойству, которое придает энергию материи при движении), так что, когда движение начинается, оно сохраняется до тех пор, пока окончательно не будет уничтожено сопротивлением природы трения. Упомянутая здесь инерция зависит от режима намотки катушки, а также от того, содержит она железный сердечник или нет.

Если рассмотреть работу, выполняемую при зарядке лейденской банки или электрического конденсатора путем подачи заряда в конденсатор последовательными небольшими порциями, то сразу становится ясно, что она должна быть пропорциональна квадрату всего выработанного количества электроэнергии. Какой бы ни была плата, пусть она будет доставлена с большого расстояния в большом количестве N равными частями. Чем больше общая сумма, тем крупнее должен быть каждый взнос и, следовательно, тем больше сумма, накопленная на конденсаторе при внесении любого заданного количества взносов. Но чем больше выдвигается какое-либо обвинение, а также чем больше обвинение, которое уже поступило, тем большее отращивание необходимо преодолеть при выдвигании этого взноса, в простой пропорции в каждом конкретном случае, и, следовательно, тем больше проделанная работа. Таким образом, вся работа, проделанная при подаче заряда, должна быть пропорциональна Q^2 . Мы предполагаем, что оно равно $\frac{1}{2}Q^2/C$, где C является постоянной величиной, зависящей от конденсатора и называемой его емкостью.

Представление о заряде как о количестве какого-либо вещества, поднимаемом и размещаемом на изолированной пластине конденсатора, соответствует только тому факту, что среда между пластинами является местом накопления энергии, когда конденсатор заряжен, которая может быть доступна только путем соединения пластин конденсатора проводом или другим проводником. Заряд — это лишь поверхностный аспект состояния среды, по-видимому, состояния деформации, к которому относится энергия.

Когда для соединения пластин используется проволока, состояние деформации исчезает; энергия выходит из среды между пластинами за счет бокового движения деформационных трубок (так что изолирующая среда находится под продольным натяжением и поперечным

давлением), которые, согласно концепции Фарадея о силовых электрических линиях, соединяющих заряд на теле с противоположными зарядами на других телах, проходят от пластины к пластине, когда конденсатор находится в равновесии в измененном состоянии. Эти трубки выходят своими концами из проволоки, унося с собой энергию, и концы тянутся друг к другу вдоль проволоки; в процессе трубка укорачивается, и энергия в проволоке теряется. Концы трубки, движущиеся таким образом, представляют части зарядов, которые были на пластинах, а противоположно направленные движения противоположных зарядов представляют ток по проводу от одного проводника к другому. Движение трубок сопровождается созданием магнитного поля, силовые линии которого бесконечны и направление которого в каждой точке перпендикулярно одновременно длине трубы и направлению, в котором она там движется. При определенных обстоятельствах трубка к тому времени, когда ее концы соприкоснутся, полностью исчезнет в проводе, и вся энергия уйдет на нагрев провода; при других обстоятельствах концы соприкоснутся до того, как трубка исчезнет, концы пересекутся, и трубка будет отнесена обратно в конденсатор и снова вставлена в противоположном направлении. В определенный момент это произойдет со всеми трубками, хотя в процессе они потеряют часть своей энергии; и конденсатор снова будет заряжен, хотя и противоположным образом тому, каким это было вначале. Затем трубки снова выдвинутся, и повторится тот же процесс: конденсатор снова будет заряжен, но в том же направлении, что и вначале, и еще раз с определенной потерей энергии. Снова будет происходить процесс разряда и зарядки, и так далее, снова и снова, пока не исчезнет вся энергия. Этот процесс, согласно современной теории потока энергии в электромагнитном поле, с большей или меньшей точностью отражает то, что происходит при колебательном разряде конденсатора.

Движение трубок с их концами на проволоке представляет собой определенное количество энергии, обычно рассматриваемой как кинетическая и называемой электрокинетической энергией. Если обозначить ток, то есть скорость, — dQ/dt , при которой изменяется заряд конденсатора, и L величину, называемую самоиндукцией, зависящую главным образом от расположения соединительного провода — намотан ли он в виде катушки или спирали, с железным сердечником или без него, или нет — электрокинетическая энергия составит $\frac{1}{2}Lc^2$. Это аналогично кинетической энергии $\frac{1}{2}mv^2$ тела (скажем, маятника) массой m и скоростью v , так что L представляет величину для проводящего устройства, аналогичную инерции, а c является аналогом скорости тела. Таким образом, вся энергия в любой момент времени

$\frac{1}{2}Q^2/C + \frac{1}{2}Lc^2$, или $\frac{1}{2}Q^2/C + \frac{1}{2}L(dQ/dt)^2$.

Потеря энергии из-за нагрева проводящего соединения до конца не изучена, хотя ее количественные законы были достаточно полно установлены и выражены в терминах величин, которые поддаются измерению. С помощью Джоуля было обнаружено, что оно пропорционально второй степени, или квадрату, тока, и величине R , зависящей от проводника, и названной его сопротивлением. Выделение тепла в проводнике, по-видимому, происходит из-за какого-то действия трения частиц проводника, возникающего при проникновении в него трубок Фарадея. Проводник не способен выдержать никакого касательного воздействия, оказываемого на него трубками Фарадея, которые, однако, когда они существуют, начинаются и заканчиваются материальными частицами, за исключением тех случаев, когда они бесконечны, какими они могут быть при излучении энергии. Когда трубки Фарадея движутся с любой обычной скоростью, они не находятся на своих концах перпендикулярно проводящей

поверхности, от которой они начинаются или у которой заканчиваются, а находятся там более или менее под наклоном к поверхности, и, следовательно, имеет место тангенциальное действие, которое, по-видимому, смещает частицы (не только у поверхности, если чередование не очень быстрое) относительно друг друга и, таким образом, вызывает выделение тепла за счет трения.

Таким образом, временная скорость выделения тепла равна Rc^2 , или $R(dQ/dt)^2$, когда единицы, в которых выражены R и c , таковы, что делают эту величину скоростью выполнения работы в истинно динамическом смысле. Это скорость, с которой уже найденная сумма энергии уменьшается, и, таким образом, уравнение

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{Q^2}{C} + L \left(\frac{dQ}{dt} \right)^2 \right\} = -R \left(\frac{dQ}{dt} \right)^2$$

выполняется, или без учета общего множителя dQ/dt , уравнение

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$$

Это последнее уравнение было установлено Томсоном и является именно тем, которое было бы получено для качающегося маятника массой L , притянутого обратно к положению равновесия силой Q/C , где Q - смещение из среднего положения, при этом его движение гасится силой сопротивления величиной R на единицу скорости.

Возможно, более поучительно рассматривать колебательное движение спиральной пружины, подвешенной вертикально с грузом на нижнем конце, как то, которое имеет дифференциальное уравнение, эквивалентное только что найденному уравнению. Когда растяжение достигает определенной величины, возникает равновесие — действие пружины просто уравнивает вес, — и если пружину растянуть дальше, возникнет баланс натяжения, стремящийся вернуть систему в положение равновесия. Предоставленная самой себе система приходит в движение, которое, если сопротивление не слишком велико, усиливается до тех пор, пока не будет достигнуто положение равновесия; и движение, которое продолжается за счет инерции массы, начинает ослабевать только по мере прохождения этого положения, и натяжение пружины становится недостаточным для уравнивания веса. Таким образом, масса колеблется вокруг положения равновесия, и эти колебания последовательно становятся все меньше и меньше по протяженности и затухают по мере того, как их энергия в конце концов расходуется на выполнение работы против трения.

Если сила сопротивления конечному движению очень велика, как, например, когда вибрирующая масса маятника или пружины погружена в очень вязкую жидкость, подобную патоке, колебаний вообще не будет. После смещения масса будет двигаться сначала довольно быстро, затем все медленнее и медленнее обратно в положение равновесия, которого она, строго говоря, точно достигнет только через бесконечное время. Сила сопротивления здесь бесконечно мала для бесконечно малой скорости, но она становится настолько большой, когда

возникает какое-либо движение, что, поскольку восстанавливающая сила уменьшается при перемещении, она в конечном итоге не выполняет никакой работы, кроме перемещения тела через сопротивляющуюся среду.

Дифференциальное уравнение применимо к пружине, если Q снова принять за смещение от положения равновесия, L как инерцию вибрирующего тела, $1/C$ как усилие, оказываемое пружиной на единицу ее растяжения (то есть жесткость пружины), и R имеет то же значение, что и раньше.

В этом случае движения, так же как и в случае движения маятника, энергия отводится за счет создания волн в среде, в которую погружен вибратор. Они распространяются от вибратора как своего источника, но в дифференциальном уравнении, которое в этом отношении является несовершенным, они не учитываются. В восполнении пропуска нет никаких трудностей, только небольшое усложнение.

Формирование таких волн спиральным пружинным вибратором можно хорошо продемонстрировать, погрузив вибрирующее тело в желоб с водой, и гораздо большую скорость затухания движения в этом случае можно сравнить со скоростью затухания на воздухе.

Было указано, что дифференциальное уравнение не отражает колебательное движение, если значение R слишком велико. Точное условие зависит от корней квадратного уравнения $Lx^2 + Rx + 1/C = 0$, получается путем записи 1 для Q и x для d/dt , а затем обработки x как величины. Эти корни $-R/2L \pm \sqrt{(R^2/4L^2 - 1/CL)}$ и, следовательно, являются реальными или мнимыми в соответствии с $4L/C$ меньше или больше, чем R^2 . Если корни действительны, то есть если R^2 больше $4L/C$, разряд не будет колебательным; упомянутые выше трубки Фарадея будут поглощаться проволокой без какого-либо возврата в конденсатор. Соответствующий результат достигается с вибратором, когда R достаточно велико, или L/C достаточно мал (слабая пружина и небольшая масса или и то, и другое), чтобы выполнить это условие.

Если, однако, корни квадратичного числа являются мнимыми, то есть если $4L/C$ должно быть больше, чем R^2 (условие, которое будет выполняться в аналоге пружины, делая пружину достаточно жесткой, а массу достаточно большой, чтобы трение не контролировало движение) движение такое, при котором Q исчезает из-за колебаний около нуля с постоянно уменьшающейся амплитудой. Полное обсуждение дает для периода колебаний $4\pi L/\sqrt{(4L/C - R^2)}$, или, если R сравнительно мал, $2\pi\sqrt{LC}$. Заряд Q уменьшается на долю $e^{-RT/2L}$ (где e - число 2.71828...) в каждый период T и так постепенно исчезает.

Таким образом, возникают электрические колебания, то есть заряженное состояние конденсатора уменьшается из-за колебаний, при которых заряженное состояние последовательно меняется на противоположное с рассеиванием энергии в проводе; и как период, так и скорость рассеяния могут быть рассчитаны, если L , C и R известны или могут быть найдены для системы. Эти величины могут быть рассчитаны и скорректированы в определенных случаях, и поскольку электрические колебания можно наблюдать экспериментально, теорию можно проверить. Это было сделано различными экспериментаторами.

Возвращаясь к иллюстрации с маятником, будет видно, что отклоненный маятник аналогичен заряженной банке, отпускание маятника соответствует подключению разрядной катушки к покрытиям, движение маятника является аналогом движения среды, из которой состоит магнитное поле, трение воздуха соответствует сопротивлению провода, которое в конечном

итоге гасит ток. Инерция или масса боба является аналогом того, что Томсон называл электромагнитной инерцией катушки и соединений; то, что сейчас обычно называют самоиндукцией проводящей системы. Составляющая силы тяжести на пути к самой низкой точке соответствует обратной, $1/C$, от емкости конденсатора.

Из аналогии следует, что точно так же, как колебания маятника можно предотвратить, погрузив стержень в более сопротивляющуюся среду, такую как патока или масло, так что при отпускании маятник соскальзывает вниз до вертикали, не минуя ее, так и при правильном соотношении сопротивления в цепи с электромагнитной инерцией катушки колебательный разряд лейденской банки также может стать невозможным.

Все это было разработано чрезвычайно поучительным образом в статье Томсона; объяснение материи движением трубок Фарадея появилось более недавно и ценно тем, что дает представление о том, как возникает эффект инерции катушки. Аналогия с маятником верна и позволяет описать факты; но следует помнить, что она становится очевидной только в результате математической обработки электрической проблемы. Эта статья имела большое значение для исследования электрических волн, используемых в беспроводной телеграфии в наше время. Это позволило рассчитать период колебаний различных систем и, таким образом, определить скорости возбуждения и приема электрических волн. Ибо такие вибраторы на самом деле представляют собой лейденские банки, или конденсаторы, разряжающиеся колебательным образом.

Это применение не было предусмотрено Томсоном, да и вряд ли могло быть, поскольку идея электрических волн в изолирующей среде появилась значительно позже, в работах Максвелла. И все же аналогия с маятником, если бы ее тогда рассмотрели, могла бы подсказать о таких волнах. Когда боб колеблется взад-вперед, воздух, в который он погружен, периодически возмущается, и волны расходятся от него наружу через окружающую атмосферу. Энергия этих волн чрезвычайно мала, в противном случае, как указывалось выше, в теорию движения маятника с сопротивлением пришлось бы включить термин для объяснения этой энергии излучения. Точно так же, когда продолжаются электрические колебания, а изолирующая среда является местом периодически меняющегося магнитного поля, электромагнитные волны распространяются наружу через окружающую среду — эфир — и энергия, уносимая волнами, является производной от начальной энергии заряженного конденсатора. Строго говоря, теория электрических колебаний Томсона также требует дополнения для учета энергии, теряемой излучением. Этого недостаточно, и все уменьшение количества энергии, присутствующей в генераторе колебаний, объясняется действием сопротивления, то есть чем—то вроде замедления трения. Несмотря на этот недостаток теории, который, в конце концов, не так серьезен, как определенные трудности точного расчета самоиндукции разряжающегося проводника, периоды колебаний могут быть найдены очень точно. Когда они известны, необходимо только измерить длину электрической волны, чтобы определить скорость ее распространения. Когда в 1888 году Генрих Герц экспериментально открыл электромагнитные волны, именно таким образом он смог продемонстрировать, что они распространяются со скоростью света.

Томсон предположил, что двойные, тройные и учетверенные вспышки молнии могут быть последовательными вспышками колебательного разряда. Он также указал, что если бы искровой промежуток был встроен в правильно расположенные конденсатор и разрядный

провод, то с помощью вращающегося зеркала Уитстона можно было бы увидеть искры, образующиеся при последовательных колебаниях, в виде "точек или коротких световых линий, разделенных темными промежутками, вместо одной световой точки или непрерывной световой линии, как это было бы, если бы разряд был мгновенным, или непрерывным, или значительной продолжительности".

Это предположение было подтверждено экспериментами, проведенными Феддерсеном и опубликованными в 1859 году (*Pogg. Ann.*, 108, 1859). Этот вопрос также исследовался в лаборатории Гельмгольца в Берлине Н. Шиллером, который, определяя период для конденсаторов с различными веществами между пластинами, смог определить индуктивную способность этих веществ (*Pogg. Ann.*, 152, 1874). [Удельная индуктивная способность изолятора - это отношение емкости конденсатора с веществом между пластинами к емкости такого же конденсатора с воздухом между пластинами.]

В статье рассматривается частный случай неколебательного разряда, полученный путем предположения, что C и Q бесконечно велики и имеют конечное отношение V (которое будет потенциалом, стр. 34, заряженной пластины). Таким образом, разряжающий проводник подвергается воздействию внезапно приложенной и поддерживаемой на одном конце разности потенциалов, в то время как другой конец поддерживается на нулевом потенциале. Решение дифференциального уравнения для этого случая покажет, как ток в проводе повышается от нуля до своего конечного устойчивого значения. Если с поставить, как и раньше, для текущего - dQ/dt , а для Q постоянное значение V/C , уравнение имеет вид

$$L \frac{dc}{dt} + Rc = V$$

что дает, поскольку $c = 0$ при $t = 0$,

$$c = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Таким образом, по истечении бесконечного времени ток становится V/R , устойчивое значение.

В заключение Томсон показывает, как путем измерения неколебательного разряда конденсатора (емкость которого может быть рассчитана) с помощью электродинамометра и обычного гальванометра, расположенных последовательно, можно определить то, что У. Вебер

назвал длительностью разрядного тока. Исходя из этого, Томсон вывел значение отношения электромагнитной единицы электричества к электростатической единице и указал методы экспериментального определения этого отношения. Это соотношение имеет фундаментальное значение в электромагнитной теории и, по сути, имеет природу скорости. Согласно Максвеллу, это скорость распространения электромагнитных волн в изолирующей среде, для которой определены единицы измерения. Впервые она была определена в лаборатории Глазго мистером Дугалдом Маккичаном и с тех пор определялась много раз. Она практически идентична скорости света, установленной лучшими экспериментами.

ГЛАВА XI

"НАТУРФИЛОСОФИЯ" ТОМСОНА И ТЕЙТА—ГИРОСТАТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ— "ЭЛЕКТРОСТАТИКА И МАГНЕТИЗМ"

"Натурфилософия"

Профессор Тейт был назначен на кафедру естественной философии в Эдинбургском университете в 1860 году и почти сразу же вступил в частые контакты с Томсоном. Оба были сотрудниками Питерхауса, обучались у одного и того же частного преподавателя — Уильяма Хопкинса — оба были увлеченными исследователями как в математике, так и в экспериментальной физике, они преподавали в братских университетах Эдинбурга и Глазго, им приходилось заниматься примерно одинаковыми предметами и решать одни и те же образовательные проблемы. Тейт был уроженцем Эдинбурга — товарищем клерка Максвелла по старой школе в Эдинбургской академии — и поэтому сталкивался в игре и на работе с коллегами того же возраста и способностей, что является одной из лучших подготовок к более крупной школе и более серьезным жизненным испытаниям. Раннее образование Томсона под заботливой опекой его отца, без сомнения, имело определенные преимущества, и его раннее поступление в колледж в значительной степени дало ему то общение с другими людьми, за которое такие преимущества никогда не являются полной компенсацией. У этих двух мужчин была большая общность мыслей и опыта, и литературное партнерство, в которое они вступили, приветствовалось как способное многое сделать для прогресса науки.

Однако в некотором смысле Томсон и Тейт были очень разными личностями. Томсон мало утруждал себя метафизическими тонкостями, его концепции были подобны концепциям Ньютона, абсолютно ясны, насколько это возможно; он никогда, по крайней мере в своем учении, не проявлял склонности обсуждать "основы динамики" или концепцию движения по прямой линии. Они воспринимались как нечто само собой разумеющееся, подобно фундаментальным идеям в книге по геометрии; и ученику предоставлялось делать то, что рано или поздно должен делать сам каждый истинно динамичный ученик, — сравнивать абстракции динамики с результатами своего опыта в мире материи и силы. Возможно, время от времени не помешало бы небольшое руководство по поводу трудностей, связанных с концепциями, с которыми сталкивается каждый начинающий, но Томсон был настолько сосредоточен на конкретном примере ручного маятника, или гиростата, или чего-то еще, что он предоставил каждому человеку формировать или корректировать свои собственные идеи на основе уроков, которые подобные примеры дают каждому, кто их внимательно изучает.

Тейт, с другой стороны, хотя он постоянно осуждал метафизические дискуссии, на самом деле был гораздо более метафизичным, чем Томсон, и, казалось, получал удовольствие от несколько трансцендентальных аргументов относительно вопросов анализа, которые были выдвинуты, особенно в отношении *Элементов кватернионов*, сэром Уильямом Роуэном Гамильтоном из Дублина, мастером, которого он очень почитал. Но есть метафизика и еще раз метафизика! а заявления так называемых метафизиков часто характеризовались как ненаучные и бесплодные, каковыми они, несомненно, и были с физической точки зрения.

Тогда Тейт был твердо убежден в важности кватернионного анализа для физики: Томсон, мягко говоря, таковым не был; и это, вероятно, было главной причиной, по которой векторной трактовке смещения, скоростей и других направленных величин нет места в совместных работах двух шотландских профессоров. В полемике Тейт был грозным противником: когда была объявлена война, он не давал пощады и ни о чем не просил, хотя никогда не сражался в не по-рыцарски. Он восхищался иностранными исследователями — и особенно фон Гельмгольцем, — но всегда был готов облачиться в доспехи и отложить копье в сторону ради дела британской науки. Томсон был гораздо менее склонен к рукопашному бою, хотя при случае он также мог смело переломить копье с противником, как в памятной дискуссии с Хаксли о возрасте Земли.

Профессорские лекции Тейта всегда были образцом ясного и логичного изложения. Каждое утверждение соответствовало рассматриваемому делу; экспериментальные иллюстрации, всегда тщательно подготовленные заранее, были востребованы в нужное время и неизменно имели успех. С Томсоном было иначе: его отступления, хотя иногда и вдохновенные, были фатальными для успеха всех усилий его ассистентов, направленных на то, чтобы сделать его лекции успешным систематическим изложением фактов и принципов элементарной физики.

Как было указано в главе IV, две книги были анонсированы в 1863 году в ходе подготовки к последующей сессии колледжа. Они не публиковались до 1867 и 1873 годов; первым изданным был знаменитый *Трактат по натурфилософии*, второй был озаглавлен *Элементы натурфилософии* и состоял в основном из части нематематических или крупнотиражных частей *Трактата*. Схема последнего представляла собой четко сформулированный скелет заявлений о принципах и результатах, напечатанных обычным шрифтом, с математическими выводами и доказательствами более мелким шрифтом. Как и следовало ожидать, "*Элементы*" для студента, чьи математические познания были достаточно широки, чтобы справиться с *Трактатом*, оказались более сложной книгой из двух для полного освоения. Но продолжение повествования, напечатанного крупным шрифтом, как это можно назвать, чрезвычайно ценно. Это памятник образу мыслей, который был характерен для обоих авторов. Они всегда держали перед собой идею или предмет, а не их символ; и таким образом, здание, которое они построили, казалось, никогда не заслонялось строительными лесами и механизмами, использованными при его возведении. И, насколько это возможно, в процессах дедукции идеи подчеркиваются повсюду; здесь нет простого введения с одного конца и изъятия с другого; результат исследуется и описывается на каждом этапе. Как и во всех других работах Томсона, физическая интерпретация учитывается на каждом этапе и доступна для исправления и избежания ошибок, а также для предложения новых исследований.

Книга в ее нынешнем виде состоит из "Раздела I, предварительного" и части "Раздела II, абстрактной динамики". Раздел I включает уже упомянутую главу по кинематике, главу о динамических законах и принципах, главы об опыте, мерах и инструментах. Раздел II

представлен только главой V, Вводной; главой VI, Статикой частицы и ее притяжения; и главой VII, Статикой твердых тел и жидкостей. Таким образом, абстрактная динамика существует без более полного рассмотрения кинетики, к которой, как и к Статике, обсуждение динамических законов и принципов должно было стать введением. Но в значительной степени, как мы увидим, кинетика рассматривается в этой вводной главе: действительно, обсуждение общих теорем динамики и их приложений к кинетике является удивительно полным.

Во второй том предполагалось включить главы о кинетике частицы, твердых и жидких тел, о колебаниях твердых тел и о волновом движении в целом. Ожидалось, что он также будет содержать главу, на которую много ссылались в томе I, о "Свойствах материи". То, что работа не была завершена, вызывает глубокое сожаление у всех физиков, сожаление, однако, теперь смягчается тем фактом, что многие предметы невыполненной программы представлены такими работами, как *Теория звука* лорда Рэлея, *гидродинамика* Лэмба и *Динамика системы твердых тел* Раута. Но все глубоко сожалеют об утрате "Свойств материи". Никто никогда не сможет написать это так, как написал бы Томсон. Его студенты получили на его лекциях представление о том, что в нем могло содержаться, и его искали с большим нетерпением. Если бы была посвящена только эта глава, потеря, вызванная прекращением выпуска книги, не была бы такой невосполнимой.

Первое издание книги было опубликовано издательством Clarendon Press в Оксфорде. Оно было напечатано господами Дж. Констебль из Эдинбурга и является прекрасным образцом математической типографии. В некотором смысле первое издание чрезвычайно интересно, поскольку не будет преувеличением сказать, что его выпуск оказал влияние на динамическую науку, а его изложение в этой стране, уступающее только этому из-за *Principia* Ньютона. Возможно, три другие работы оказали такое же влияние на математическую мысль — "*Механика Селеста*" Лапласа, "*Механическая аналитика*" Лагранжа и "*Теория анализа шалера*" Фурье.

Второе издание было выпущено издательством Кембриджского университета в виде частей I и II в 1878 и 1883 годах. Различные молодые математики, ныне занимающие видное положение, — можно упомянуть профессора Кристал из Эдинбурга и профессора Бернсайда из Гринвича, — прочитали корректуры, и в целом они на удивление свободны от типографских и других ошибок. С выпуском Части II от продолжения определенно отказались.

Во втором издании многие темы обсуждаются более полно, и содержание включает очень ценный отчет о циклоидальном движении (или колебательном движении, как его чаще называют), а также переработанную версию главы по статике, которая составляет заключительную часть книги и в которой обсуждаются некоторые из важнейших проблем земной и космической физики.

Время от времени высказывались различные предположения относительно соответствующих частей, внесенных в работу двумя авторами, но они, как правило, очень далеки от истины. Способ составления секций о циклоидальном (колебательном) движении дает некоторое представление о методе работы Томсона. Его корректуры ("*Т* и *Т-тире*", как называли книгу авторы) доставлялись с ним по железной дороге и на пароходе, и он неустанно работал (не отвлекаясь, однако, полностью от того, что происходило вокруг него!) над исправлениями и дополнениями. Он сильно исправил корректуры, а затем перешел к дополнительной рукописи. Таким образом, когда он дошел до краткого первоначального § 343, он значительно расширил его в первом случае и переходил от раздела к разделу, пока не были вставлены дополнения,

пронумерованные от § 343a до § 343r, всего около десяти страниц мелкого шрифта. Аналогичным образом § 345 был расширен путем добавления §§ 345 (i) к 345 (xxviii), главным образом в отношении гиросtatического доминирования. Недостатком этого метода было то, что он прерывал работу принтеров и долго сохранял шрифт, но материал часто был тем более вдохновляющим, что создавался под давлением типографии. Действительно, таким образом, без сомнения, было написано многое из того, что, к большому ущербу для динамической науки, в противном случае вообще никогда бы не было написано.

Обсуждение кинематики начинается с рассмотрения движения по непрерывной линии, изогнутой или прямой. Это, естественно, наводит на мысль об идеях кривизны и извилистости, которые полностью рассматриваются математически, прежде чем вводится понятие скорости. Когда это делается, направленность скорости не так сильно подчеркивается, как это имеет место сейчас: например, о точке говорят как о движущейся по кривой с равномерной скоростью; и, конечно, на языке настоящего времени, который стал более точным благодаря векторным идеям, если не благодаря векторному анализу, скорость точки, которая постоянно меняет направление своего движения, не может быть равномерной. То же замечание можно сделать относительно учета ускорения: в обоих случаях привязка величины к трем декартовым осям выполняется незамедлительно, и учитываются только изменения компонентов, таким образом фиксированных в направлении.

Не может быть никаких сомнений в том, что большей ясности достигает процесс, на котором впоследствии настаивал Тейт, - рассмотрение с помощью годографической диаграммы изменений скорости в последовательные интервалы времени и на основе этого определение направления и величины скорости изменения в каждый момент времени. Этот метод действительно указан в § 37, но диаграмма не приведена, а свойства годографа исследуются с помощью декартовых уравнений. Однако этот предмет рассматривается в *Элементах* указанным здесь методом.

Примечательными особенностями этой главы являются очень полное обсуждение простого гармонического или колебательного движения, разделы, посвященные вращению, геометрии качения и прецессионного движения, а также кривизне поверхностей, исследуемых кинематическими методами. Замечание, сделанное в § 96, следует иметь в виду всем, кто пытается решить гиросtatические задачи. Дело в том, что точно так же, как ускорение, которое всегда происходит под прямым углом к движению точки, приводит к изменению направления движения, но не к изменению *скорости* точки (оно влияет на *скорость*), так и действие, всегда стремящееся вызвать вращение вокруг оси под прямым углом к той, вокруг которой уже вращается твердое тело, изменит направление оси, вокруг которой вращается тело, но не приведет к изменению скорости поворота.²⁰

В этой главе дается очень полный и ясный отчет об анализе деформаций в рамках подготовки к рассмотрению упругости, которое будет представлено далее в книге; и добавлено длинное приложение о сферических гармониках, которые определяются как однородные функции координат, удовлетворяющие дифференциальному уравнению распределения температуры в среде, в которой наблюдается постоянный поток тепла, или распределения потенциала в электрическом поле. Это приложение по своему объему является одним из самых виртуозных обсуждений этой темы, когда-либо написанных, хотя, с точки зрения строгости доказательства, требуемой современной теорией функций, оно может вызвать возражения.

В следующей главе, озаглавленной "Динамические законы и принципы", авторы с самого начала заявляют о своем намерении внимательно следовать *Principia* при обсуждении общих основ предмета. Соответственно, после некоторых определений излагаются законы движения, и предоставляется возможность принять и обеспечить применение гауссовой системы абсолютных единиц для динамических величин. Как было указано выше, различные трудности более или менее метафизического характера, которые должны возникнуть у каждого вдумчивого студента при рассмотрении законов движения Ньютона, не обсуждаются, и, вероятно, такое обсуждение выходило за рамки схемы, которую имели в виду авторы. Но метафизика не исключается полностью. Утверждается, что "материя обладает врожденной способностью сопротивляться внешним воздействиям, так что каждое тело, насколько это возможно, остается в состоянии покоя или движется равномерно по прямой линии", и утверждается, что это свойство — инерция — пропорционально количеству материи в теле. Это утверждение подвергнуто критике Максвеллом в его обзоре *натурфилософии* в *Nature* в 1879 году (одна из последних статей, написанных Максвеллом). Он спрашивает: "Является ли фактом, что "материя обладает какой-либо способностью, врожденной или приобретенной, сопротивляться внешним воздействиям"? Разве каждая сила, действующая на тело, не производит всегда то изменение в движении тела, по которому определяется его ценность как силы? Следует ли обвинять чашку чая в сопротивлении подслащающему воздействию сахара, потому что она упорно отказывается становиться сладкой, если в нее не положить сахар?"

Эта врожденная сила сопротивления - всего лишь *суть* "Определения III" Ньютона, данного в *Принципах*, и утверждение, против которого возражает Максвелл, является лишь вольным переводом этого определения. Более того, когда тело притягивается или толкается другими телами, оно реагирует на эти тела с равной силой, и эта реакция так же реальна, как и само действие: ее существование обусловлено инерцией тела. Это определение, с одной точки зрения, является лишь констатацией того факта, что ускорение, создаваемое телом при определенных обстоятельствах, зависит от самого тела, а также от других соответствующих тел, но с другой стороны, его можно рассматривать как объясняющее реакцию. Масса или инерция тела - это только такая величина, что для разных тел при одинаковых обстоятельствах, связанных с действием других тел на придание им ускорения, произведение массы и ускорения одинаково для всех. Это, однако, очень важное свойство тела, поскольку это один из факторов кванта кинетической энергии, который тело вносит в энергию системы вследствие своего движения относительно выбранных осей отсчета, которые принимаются как находящиеся в состоянии покоя.

Относительность движения не подчеркивается так сильно в *натурфилософии*, как в некоторых более современных трактатах, но она не упускается из виду; и какой бы ни была точка зрения на важность рассмотрения таких соображений в трактате по динамике, не может быть сомнений в том, что возвращение к Ньютону в целом было благотворным изменением способа преподавания предмета.

Трактовка силы в первом и втором законах движения откровенно причинна. Сила является здесь *причиной* скорости изменения импульса; и с этой точкой зрения профессор Тейт в своих собственных работах всегда боролся, надо признать, очень убедительно. Согласно ему, сила - это просто скорость изменения импульса. Следовательно, силы в уравнениях движения являются всего лишь выражениями, значения которых в виде скоростей изменения импульса

должны быть сделаны явными путем решения таких уравнений в терминах известных величин. И, по-видимому, нет никакого логического выхода из этого вывода, за исключением того, что ссылка на причину исчезает как способ выражения.

Обсуждение третьего закона движения особенно ценно, поскольку, как хорошо известно, в нем было обращено внимание на тот факт, что в последних предложениях *Схолии*, которые Ньютон добавил к своим замечаниям о третьем законе, скорости действия действующих и противодействующих сил между телами равны и противоположны. Таким образом, вся работа, совершаемая за любой момент времени частями системы друг над другом, равна нулю, и доктрина сохранения энергии фактически содержится в утверждении Ньютона. Единственный момент, в котором теория не была полной в том, что касается обычных динамических действий, касался работы, совершаемой против трения, для которой, когда тепло не принималось в расчет, не было видимого эквивалента. Утверждение Ньютона о равенстве того, что Томсон и Тейт называли "активностью" и "контрактивностью", однако, совершенно абсолютно. В доработке теории энергии в части преобразования тепла в работу Томсон, как мы видели, сыграл очень заметную роль.

После введения в динамические законы наиболее интересной частью этой главы является подробное обсуждение содержащихся в ней уравнений движения Лагранжа, принципа наименьшего действия и большого числа чрезвычайно важных приложений этих теорий. Оригинальность и наводящая на размышления эта часть книги, взятая сама по себе, позволила бы поставить ее в один ряд с великими классиками — *"Механикой Селеста"*, *"Аналитической механикой"* и мемуарами Якоби и Гамильтона, — все они были результатом *"Principia"*, и из которых, вместе с *"Principia"*, черпали вдохновение авторы *"Натурфилософии"*.

Возможно, дело в том, как предположил сам профессор Тейт, что до сих пор не появилось никого, кто мог бы в полной мере согнуть лук, созданный Гамильтоном; но когда появится этот Улисс, окажется, что его сила и мастерство были подпитаны изучением *натурфилософии*. Уравнения Лагранжа теперь, благодаря физической реальности, которую объяснения и примеры Томсона и Тейта придали обобщенным силам, координатам и скоростям, применимы ко всем видам систем, которые раньше казались недоступными динамическому анализу. Как выразился Максвелл, "Заслуга в разрушении монополии великих мастеров заклинаний и превращении всех их чар в привычные для нашего слуха слова в значительной степени принадлежит Томсону и Тейту. Два северных волшебника были первыми, кто без угрызений совести или страха произнес на своем родном языке истинные названия тех динамических концепций, которые маги древности имели обыкновение вызывать только с помощью невнятных символов и нечленораздельных уравнений. И теперь самые слабые из нас могут повторить слова силы и принять участие в динамичных дискуссиях, которые несколько лет назад мы должны были предоставить тем, кто лучше нас".

Очень примечательной особенностью этого обсуждения является использование идеи "игнорирования координат". Переменные, используемые в уравнениях Лагранжа, должны быть такими, чтобы можно было выразить положения частей системы, определяющих движение, для любого момента времени. Эти части своими перемещениями управляют перемещениями других частей через связи системы. Их называют независимыми координатами, а иногда и "степенями свободы" системы. В выражения кинетической и потенциальной энергий, из которых с помощью формального процесса выводятся уравнения движения, число которых

равно количеству степеней свободы, значения этих переменных и соответствующих скоростей входят в общем случае. Но в определенных случаях некоторые переменные представлены только соответствующими скоростями, а сами переменные не фигурируют в уравнениях движения. Например, когда маховики являются частью системы и связаны с остальной частью системы только своими подшипниками, угол, на который колесо повернулось в любой момент времени, не имеет значения, единственное, что влияет на энергию системы - это угловая скорость или момент импульса колеса. Томсон и Тейт говорят, что в таком случае система находится под гиростатическим господством. (См. "Гиростатическое действие", стр. 214 ниже.)

Более того, поскольку сила, представляющая собой скорость роста импульса, соответствующего любой координате, численно равна скорости изменения с этой координатой разности кинетической и потенциальной энергий, каждая сила равна нулю, для которой координата не указана; и, следовательно, соответствующий импульс постоянен. Но этот импульс выражается посредством значений других координат, которые действительно появляются, и их скоростей со скоростями для отсутствующих координат; и столько уравнений составляется с помощью постоянных значений таких импульсов, сколько координат отсутствует. Соответствующие скорости могут быть определены из этих уравнений в терминах постоянных импульсов и появляющихся координат, а также их скоростей. Найденные таким образом значения, подставленные в выражения для кинетической и потенциальной энергий, удаляют из этих выражений все ссылки на отсутствующие координаты. Затем из нового выражения для кинетической энергии (в котором теперь появляется функция постоянных импульсов, которая берется как дополнение к потенциальной энергии) формируются уравнения движения для фактически присутствующих координат, и их достаточно для определения движения. Таким образом, другие координаты в определенном смысле игнорируются, и этот метод называется методом "игнорирования координат".

Теоремы действия, имеющие большое значение для общей теории оптики, завершают эту главу; но о них невозможно дать здесь какой-либо отчет без обсуждения технических деталей, выходящих за рамки чтения обычных изучающих динамику.

В Приложении к Части I приводится описание счетных машин непрерывного действия. Обычные счетные машины, такие как "арифмометр" Томаса Кольмарского, выполняют вычисления и отображают результат в виде ряда цифр. Но описанные здесь машины имеют другой характер: они демонстрируют свои результаты с помощью значений непрерывно меняющейся величины. Первый предназначен для прогнозирования высоты приливов на будущее время в любом порту, для которого уже получены данные о высоте приливов, с помощью саморегистрирующегося приливомера. Два из них были сделаны в соответствии с идеями, изложенными в этом Приложении; один находится в музее Южного Кенсингтона, другой - в Национальной физической лаборатории в Буши-Хаусе, где он используется в основном для нанесения на бумагу кривых будущих высот приливов для портов в Индийском океане. На основе этих кривых составляются таблицы приливов и отливов, которыми пользуются моряки и другие лица.

Другая машина, описанная в этом Приложении, была разработана для механического решения одновременных линейных уравнений. Здесь невозможно объяснить интересную конструкцию из шести рам, несущих столько же шкивов, регулируемых по направляющим (для решения уравнений с участием шести неизвестных величин), которую сконструировал Томсон и которая

сейчас находится на факультете естественной философии в Глазго. Идея создания первой практической машины для такого количества переменных состояла в том, чтобы ее можно было использовать для расчета поправок к значениям, уже найденным для шести элементов кометы или астероида. Машина была изготовлена, но при ее применении возникли некоторые механические трудности, и эксперименты с ней в то время не проводились. Однако, весьма возможно, что он все же будет введен в обиход.

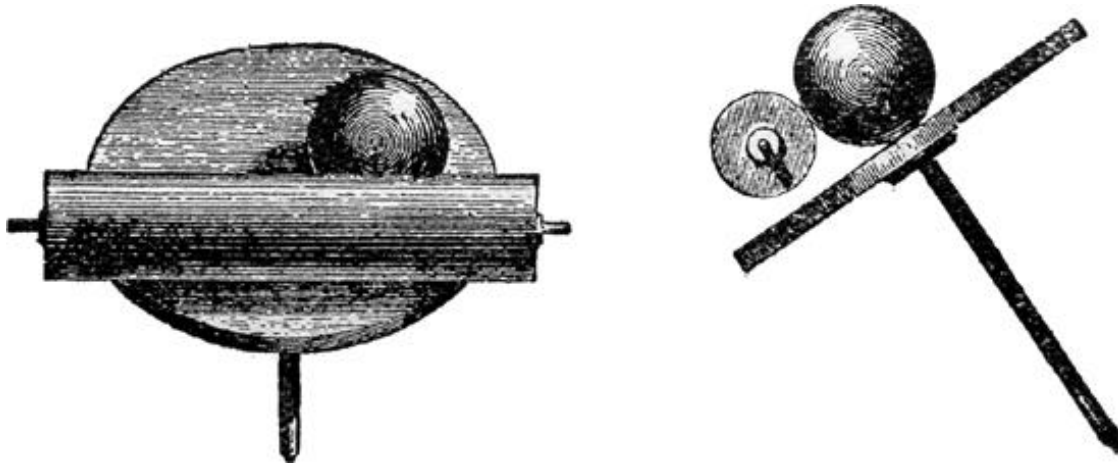


Рис. 14.

Но самым замечательным из этих механических устройств является машина для анализа кривых, построенных саморегистрирующимся датчиком прилива, чтобы отображать постоянные гармонических кривых и, таким образом, давать возможность прогнозировать высоту прилива либо с помощью машины для прогнозирования прилива, либо путем расчетов. Однажды в 1876 году Томсон заметил своему брату Джеймсу Томсону, в то время профессору инженерного дела в Глазго, что все, что ему требовалось для создания анализатора приливов, - это интегрирующая машина, более подходящая для его целей, чем обычный тип интегратора, используемый геодезистами и военно-морскими архитекторами. Джеймс Томсон сразу же ответил, что он изобрел задолго до этого то, что он назвал дисково-глобусно-цилиндрическим интегратором. Он состоял из латунного диска с наклоненной к горизонтали плоскостью, который можно было поворачивать вокруг своей оси с помощью колесного зацепления с зубьями на краю диска и приводить в движение оператором способом, который сейчас будет описан. Параллельно и близко к диску, но не касаясь его, располагался горизонтальный цилиндр из латуни диаметром около 2 дюймов (называемый регистрирующим цилиндром), а между диском и этим цилиндром был заложен металлический шар диаметром около $2\frac{1}{2}$ дюймов. Когда диск находился в состоянии покоя, а шарик катился между цилиндром и диском, след его катания на последнем представлял собой прямую горизонтальную линию, проходящую через центр. Предположим тогда, что точка соприкосновения шара с диском находилась с одной стороны, на расстоянии от центра, и что диск затем поворачивался, то за счет трения между ним и диском шар катился и, таким образом, вращал цилиндр. Угловая скорость качения и, следовательно, угловая скорость цилиндра были пропорциональны скорости части диска, соприкасавшейся с ним, то есть ω . Она также была пропорциональна скорости вращения диска.

Теперь будет очевиден способ, с помощью которого эта машина выполняет интегрирование. Представьте, что область, которую нужно найти, находится между кривой и прямой базовой линией, нарисованной на полосе бумаги. Это натянуто на большой цилиндр с базовой линией вокруг цилиндра. Мы называем это бумажным цилиндром. Расстояния различных точек кривой от базовой линии равны значениям. Горизонтальная перекладина, параллельная цилиндру, имеет вилку на одном конце и выступающий выступ на другом. Шар просто помещается между зубцами вилки, и когда стержень перемещается в направлении своей длины, шар перемещается по диску и цилиндру. Когда стержень на другом конце находится на базовой линии, центр шара находится в центре диска, и поворот диска не приводит к вращению цилиндра. Когда стержень смещается по линии своей собственной длины, чтобы перенести фасон от базовой линии к точке на кривой, шар смещается на расстояние u , и под действием шара происходит соответствующий поворот цилиндра. При использовании инструмента оператор поворачивает бумажный цилиндр, сохраняя при этом форму кривой, а вращение диска осуществляется уже упомянутой передачей, которая приводится в движение валом, зацепленным с валом бумажного цилиндра. Таким образом, смещение шара всегда равно u , ординате кривой, и при любом смещении dx вдоль базовой линии регистрирующий цилиндр поворачивается на угол, пропорциональный $u dx$. Таким образом, любой конечный угол поворота пропорционален интегралу от $u dx$ для соответствующей части кривой: шкала вокруг одного конца регистрирующего цилиндра дает этот угол. Томсон сразу понял, что эта чрезвычайно хитроумная интегрирующая машина - именно то, что ему требовалось для его цели. Кривая высот приливов, построенная (в уменьшенном масштабе, конечно) с помощью приливомера, на самом деле является результирующей большого количества простых кривых, представленных рядом гармонических членов, коэффициенты которых являются определенными интегралами. Проблема заключается в оценке этих интегралов; и обычно используемый метод заключается в их получении путем измерения ординат кривой и сложного процесса вычисления. Но один из них представляет собой просто интегральную площадь между кривой и базовой линией, соответствующую среднему уровню воды, а остальные являются интегралами от величин типа $u \sin nx \cdot dx$, где u - ордината кривой, а n число, обратно пропорциональное периоду приливной составляющей, представленной термином.

Все это было необходимо, чтобы дать интеграл от члена $u \sin nx \cdot dx$, должен был заставить диск колебаться вокруг своей оси при повороте бумажного цилиндра на угол, пропорциональный x . Таким образом, один диск, глобус и цилиндр были расположены точно так, как было описано для интеграла от $u dx$, и при этом столько других, сколько было гармонических членов, подлежащих оценке по кривой, были объединены следующим образом. Все диски располагались в одной плоскости, их центры находились на одной горизонтальной линии, а оси цилиндров также располагались на одной линии, и единственная скользящая планка с вилкой для каждого шара давала в каждом случае смещение u от центра диска.....

Необходимые различные скорости колебаний были приданы дискам валами, зацепленными с бумажным цилиндром, цепями колес, нарезанных с соответствующим количеством зубьев для требуемой скорости.

Таким образом, углы, на которые поворачивались регистрирующие цилиндры, когда кривая на бумажном цилиндре проходила по стилю, были пропорциональны требуемым интегралам, и было необходимо только откалибровать градуировку шкал этих цилиндров с помощью известных кривых для получения интегралов в надлежащих единицах измерения.

Одна из таких машин, анализирующая четыре гармонические составляющие, находится на факультете естественной философии в Глазго; гораздо более крупная машина для анализа кривой прилива, содержащей пять пар гармонических членов, или всего одиннадцать составляющих, была изготовлена для Комитета Британской ассоциации по наблюдениям за приливами, и, вероятно, сейчас находится в музее Южного Кенсингтона.

Но еще более замечательные приложения, которые Томсон применил к интегрирующей машине своего брата, заключались в механическом интегрировании линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, интегрировании общего линейного дифференциального уравнения любого порядка, и, наконец, в интегрировании любого дифференциального уравнения любого порядка.

Все эти заявки были сделаны за несколько дней, почти за несколько часов, после того, как Джеймс Томсон впервые описал элементарную машину, и документы, содержащие описания требуемых комбинаций, были немедленно продиктованы Томсоном своему секретарю и отправлены для публикации. Очень возможно, что он в какой-то степени продумал эти приложения раньше; но маловероятно, что он сделал это в деталях. Но, даже если бы это было так, соединение ряда машин с помощью одной управляющей планки и создание колебаний дисков, управляемых движением простой точки вдоль кривой, чтобы обеспечить требуемые коэффициенты Фурье, были почти мгновенными и представляли собой пример изобретения, достойного вдохновения.

Здесь также следует отметить геометрическую направляющую для использования в предохранительных клапанах, катетометрах и других инструментах, а также режим "отверстие-щель-плоскость" для такого крепления инструмента, который сейчас используется во всех лабораториях. Это были изобретения Томсона, и на их важности настаивает *Натурфилософия*.

В части II рассматриваются основные темы, касающиеся притяжения, упругости, таких замечательных примеров гидростатики, как теория равновесия приливов и отливов и равновесие вращающихся жидких сфероидов, а также такие проблемы астрономической и земной динамики, как распределение вещества на земле, имеющие отношение к этому вопросу о прецессии равноденствий, приливном трении, жесткости земли, эффектах упругих приливов и отливов, вековом охлаждении земли, возрасте земли и "возрасте солнечного тепла". Из них, за исключением возраста земли, мы рассмотрим следующие. мы не будем пытаться давать какой-либо отчет. На важность оригинального вклада в эластичность, содержащегося в книге, указывает большое место, посвященное *натурфилософии* в продолжении *истории эластичности* профессора Карла Пирсона, написанном Тодхантером. Тяжелая задача редактирования части II была выполнена в основном сэром Джорджем Дарвином, который внес много заметных дополнений на основе своих собственных исследований к материалу, содержащемуся в первом издании.

В следующей главе будет предпринята попытка изложить взгляды Томсона на вопрос о возрасте земли. Когда они были опубликованы, они привлекли большое внимание и подверглись значительной враждебной критике со стороны геологов и биологов, чьи процессы, как считалось, они ограничивали совершенно неадекватным периодом времени.

Гиростатическое действие

Томсон в своих лекциях и других работах уделял большое внимание движению гиростатов и влиянию включения гиростатов в систему на ее свойства. Была сделана ссылка на трактовку "гиростатического доминирования" в работе "Томсон и Тейт". Гиростат состоит из диска или колеса с массивным ободом, которое вращается внутри корпуса или каркаса, с помощью которого все устройство можно перемещать или поддерживать, не создавая помех колесу. Примером может служить обычная игрушка, состоящая из колеса с массивным ободом и легкой рамой. Но гораздо более крупные и тщательно изготовленные инструменты, в которых колесо полностью закрыто, позволяют проводить наиболее интересные эксперименты. Кажется, что при вращении колеса свойства корпуса полностью изменяются, и, конечно же, корпус не позволяет увидеть какие-либо внешние изменения.

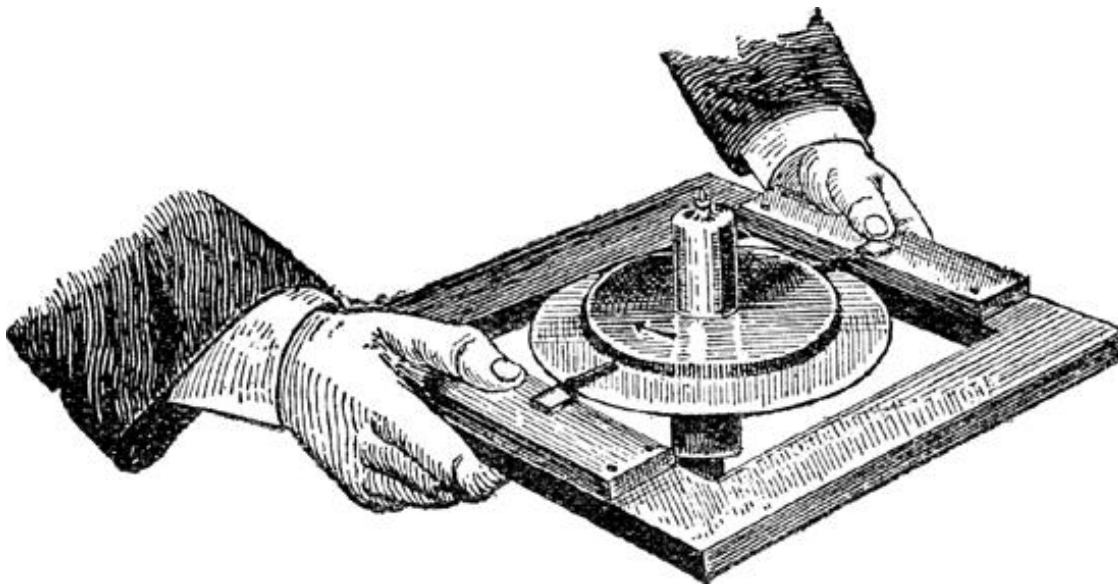


Рис. 15.

На рисунке 15 показана одна из форм гиростата, установленного на горизонтальной раме, которую держит в руках экспериментатор. Ось маховика расположена вертикально внутри трубчатой части корпуса; маховик находится внутри части, на которой выгравирована стрелка, указывающая направление вращения. Вокруг корпуса в плоскости колеса расположен выступающий обод, заточенный до края, на который можно опираться при проведении других экспериментов. К ободу привинчены две выступающие оси, которые могут вращаться в подшипниках с двух сторон рамы, как показано на рисунке. Центр масс колеса находится на уровне этих шарниров, так что инструмент будет оставаться направленным вверх обоими концами оси.

Если маховик не вращается, экспериментатор может носить устройство с собой, и маховик и корпус движутся вместе с ним, как если бы гиростат был просто обычным твердым телом. Но теперь снимите гиростат с рамы и приведите колесо во вращение. Это делается с помощью бесконечного шнура, крепко намотанного на небольшой шкив на оси (доступ к которому обеспечивается через отверстие прямо напротив в корпусе) и пропущенного также вокруг большего шкива на валу двигателя. При запуске двигателя сначала необходимо очень осторожно натягивать шнур, чтобы он не скользил по шкиву, в противном случае двигатель

замедлится и, возможно, сгорит от тока. Маховик постепенно набирает скорость, и тогда шнур можно натянуть достаточно туго, чтобы не происходило проскальзывания. Когда скорость достаточно велика, шнур перерезается одним ударом острого ножа и заканчивается.

Теперь гиростат установлен на своих шарнирах в раме вертикально и перемещается примерно так, как это было раньше. Если экспериментатор, держа рамку, как показано на рисунке, повернется в направлении стрелки, то есть вращения, ничего не произойдет. Однако, если он поворачивается в другую сторону, гиростат немедленно поворачивается на своих шарнирах так, чтобы направить другой конец оси вверх. Если экспериментатор продолжает свое вращательное движение, гиростат теперь находится в состоянии покоя, поскольку теперь он вращается в направлении вращения. Таким образом, при полном отсутствии гравитационной устойчивости (поскольку центр находится на одном уровне с шарнирами) гиростат находится в устойчивом равновесии при вращении в направлении вращения, но находится в неустойчивом равновесии при вращении в противоположном направлении.

Таким образом, если бы наблюдатель ничего не знал о вращении маховика и мог видеть и осязать только внешнюю сторону корпуса, поведение прибора вполне могло бы показаться весьма удивительным.

Это случай того, что Томсон и Тейт называют "гиростатическим доминированием", которое очень подробно рассматривается в их разделах с 345 (vi) по 345 (xxviii) части I. Здесь можно отметить, что этот случай движения может быть легко рассмотрен математически чрезвычайно элементарным образом, и неустойчивость одного случая и устойчивость другого становятся понятными новичку, который имеет только представление о составе угловых моментов относительно различных осей.

Год или два назад профессор Пикеринг из Гарварда предположил, что тот факт, что самый внешний спутник Сатурна вращается в направлении, противоположном вращению планеты, может быть связан с тем фактом, что первоначально Сатурн вращался в направлении движения этой луны, но поскольку его движение вокруг Солнца было противоположно направлению его вращения, он был, так сказать, перевернут вверх ногами, подобно гиростату! Предполагается, что другие спутники были выведены из строя позже, поскольку их вращение прямое. Профессор Пикеринг ссылается на эксперимент (аналогичный описанному выше), который он называет новым. Томсон демонстрировал этот эксперимент в течение многих лет в качестве примера общего обсуждения в книге "Томсон и Тейт", и его теория уже была подробно опубликована.²¹

Томсон раньше показывал посетителям множество других экспериментов с гиростатами. Многие из них указаны в книге "Томсон и Тейт". Прецессионное движение земли - это гиростатический эффект, обусловленный дифференциальным притяжением солнца, которое стремится привести плоскость экватора в соответствие с эклиптикой и, таким образом, изменяет направление оси вращения. Старые студенты, вероятно, помнят уравновешенный земной шар с наклонной материальной осью, вращающейся вокруг горизонтального кольца, с помощью которого можно было изучать кинематику движения и отслеживать смещение точек равноденствий на эклиптике.

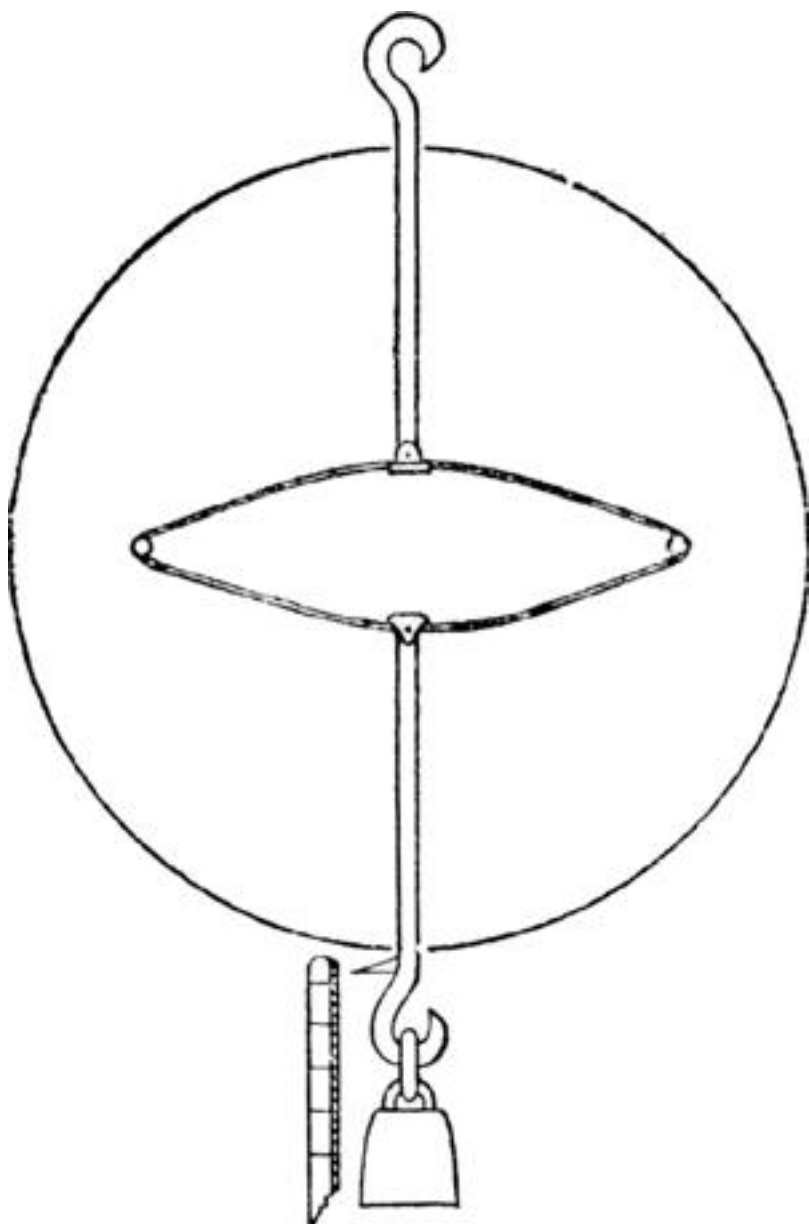


Рис. 16.

Другой пример господства гиростики, обсуждаемый в "Томсоне и Тейте", приводится в весьма примечательном обращении, озаглавленном "Кинетическая теория материи", с которым сэр Уильям Томсон выступил в Секции А Британской ассоциации в Монреале в 1884 году. На рисунке 16 показана обычная двойная "тренировочная пружина", верхний и нижний элементы которой несут два зацепленных стержня, как показано на рисунке. Если верхний крюк прикрепить к неподвижной опоре, а на нижний повесить груз, пружина будет растянута, и устройство будет находиться в равновесии при определенном удлинении. Если груз опустить еще ниже, а затем предоставить самому себе, он будет вибрировать вверх и вниз с периодом, зависящим от равновесного удлинения, создаваемого грузом. То же самое произойдет, если заменить каретную пружину спиральной пружиной. Сферический корпус, через который свободно проходят крючковатые стержни, скрывает внутренние детали от посторонних глаз.

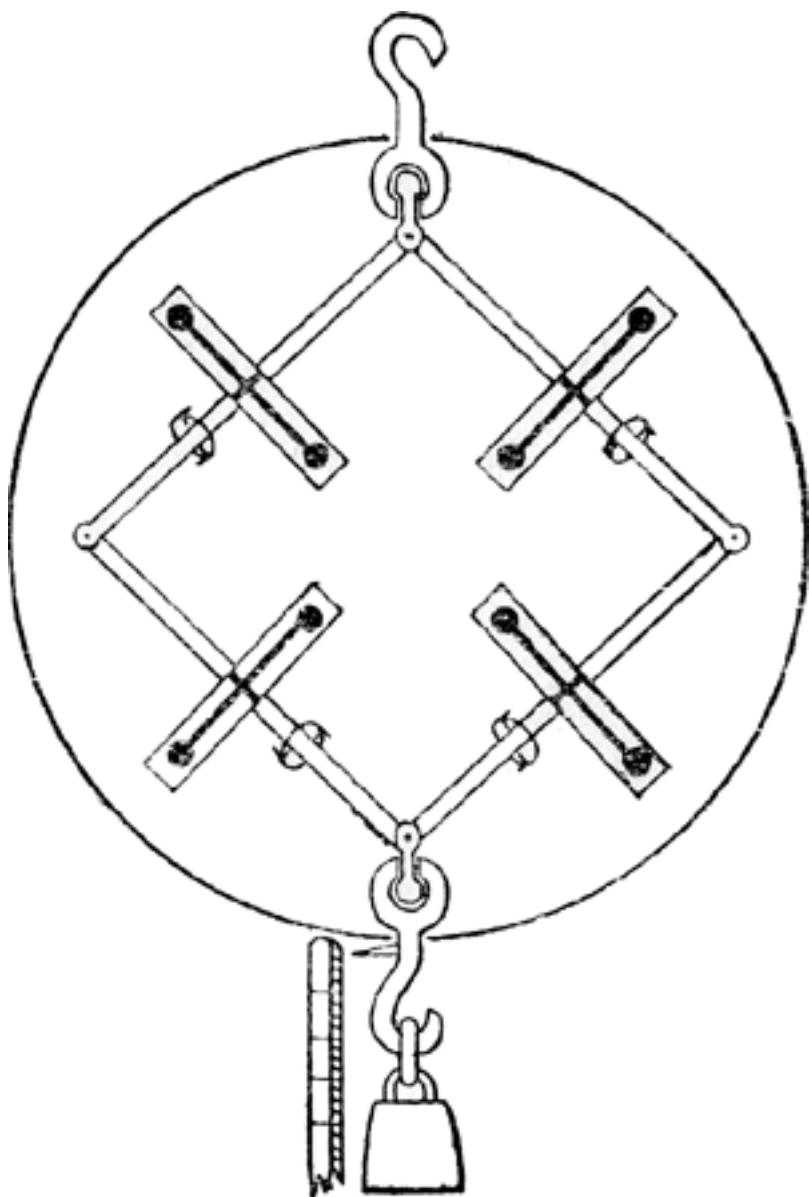


Рис. 17.

На рисунке 17 показаны два зацепленных стержня, как и в первом случае, прикрепленных шарнирами к двум противоположным углам рамы, образованной из четырех стержней, соединенных вместе на своих концах. Каждый из них разделен посередине для установки гиростата, ось которого шарнирно закреплена на смежных концах двух половин стержня. Сферический корпус, обозначенный кружком, снова скрывает внутреннее устройство от постороннего взгляда, но позволяет крючковатым стержням свободно перемещаться вверх и вниз. Шарниры позволяют поворачивать раму, гиростаты и все остальное вокруг линии расположения крючков.

Если теперь гиростаты не будут вращаться, рама будет совершенно безвольной и ни в малейшей степени не будет сопротивляться тяге, прилагаемой весом. Но если гиростаты вращать в направлениях, показанных кругами, со стрелками, нарисованными вокруг стержней, то вокруг лески, соединяющей крючки, будет создаваться угловой момент всей системы, и если приложить вес или усилие для вытягивания рамы вдоль этой лески, натяжению будет

сопротивляться пружина, как это было в другом случае. Более того, равновесие будет достигнуто с удлинением, пропорциональным подвешенному весу, и будут совершаться небольшие колебания, как если бы внутри была пружина вместо гири.

В зависимости от того, вытягивается или укорачивается рама, увеличивается или уменьшается угловой момент гири вокруг лески, соединяющей крючки, и рама, несущая с собой гири, поворачивается вокруг шарниров в ту или иную сторону со скоростью, необходимой для поддержания постоянного значения углового момента. Но это не будет воспринято извне.

Таким образом, вращение маховиков придает вялой раме упругость, которой обладает пружина; без разбора модели разницу невозможно заметить. Это иллюстрирует идею Томсона о том, что упругость вещества может быть обусловлена движением молекул или групп молекул тела, заключенных в соединительный каркас, деформируемый приложенными силами, как в этой модели, и вызывающий смещения, которым в результате движения оказывается сопротивление.

И здесь можно упомянуть также объяснение Томсоном открытого Фарадеем явления вращения плоскости луча поляризованного света, который проходит вдоль силовых линий магнитного поля. Это вращение полностью отличается от того, которое возникает при пропускании поляризованного света по трубке, заполненной раствором сахара или винной кислоты. Если луч отражается после прохождения и вынужден повторно пересекать среду, вращение аннулируется в последнем случае, а в первом оно удваивается. Это привело Томсона к мнению, что в сахаре, винной кислоте, кварце и т.д. Поворот обусловлен структурой вещества, а в магнитном поле - вращением, уже существующим в среде. Он обычно говорил, что очень большое количество мельчайших спиральных полостей, все в одном направлении, и все правосторонние или все левосторонние, в сахаре или кварце, дали бы эффект; с другой стороны, магнитное явление могло быть вызвано только каким-то устройством, аналогичным очень большому количеству волчков, или гири, встроенных в среду с их осями, направленными в одном направлении (или преимущественно в этом направлении) и все вращающимися одинаково. Томсон предположил, что вращение этих вершин, или гири, вызвано магнитным полем и, по существу, является тем, что составляет намагничивание среды.

Пусть рама гири статических пружинных весов, описанных выше, повернется вокруг лески, соединяющей крючки, так, чтобы точно компенсировать, поворачиваясь в противоположном направлении, угловой момент относительно этой лески, создаваемый маховиками; тогда устройство в целом не будет иметь углового момента; и большое количество таких весов, все очень мелкие и соединенные вместе, образуют вещество, не имеющее углового момента ни в одной части. Но теперь с помощью эквивалента магнитной силы вдоль линий крючков пусть будет произведен другой угловой поворот рамок; среда будет обладать определенным угловым моментом в каждой части. Если волна поперечных колебаний, параллельных одному направлению (то есть, если волна плоскополяризована), проникает в среду в направлении осей рамок, направление вибрации будет изменяться по мере распространения волны, то есть плоскость поляризации будет поворачиваться.

Более поздние исследования показали влияние магнитного поля на спектр света, производимого в поле и рассматриваемого с помощью спектроскопа в направлении, перпендикулярном полю — так называемый эффект Зеемана - и объяснение этого эффекта уравнениями движущихся электрических зарядов, которые по сути являются уравнениями

гиростатики, наводит на мысль об аналогии или соответствии между системами движущихся электронов, которые составляют эти заряды, и некоторыми такими гиростатическими молекулами, как представлял Томсон. Было отмечено, что эффект Зеемана, по крайней мере, в его простых формах, может быть точно воспроизведен движением обычного маятника с гиростатом в стержне, ось которого направлена вдоль стержня подвески.²²

Электростатика и магнетизм

В течение десяти лет, с 1863 по 1873 год, Томсон был чрезвычайно занят литературной работой. В 1872 году, через пять лет после публикации "Трактата *о натурфилософии*" и незадолго до появления "Элементов", Дж. Компания Macmillan & Co. опубликовала для него сборник мемуаров под названием "*Перепечатка статей по Electrostatics and Magnetism*". Том содержит 596 страниц, и рассматриваемые темы варьируются от "Равномерного движения тепла и его связи с математической теорией электричества" (статья, уже описанная в главе II выше) и обсуждения электрометров и электростатических измерительных приборов до полной математической теории магнетизма. Предмет электростатики естественным образом привел к рассмотрению электроизмерительных приборов в том виде, в каком они существовали сорок лет назад (около 1867 г.), и их замене другими, показания которых изо дня в день должны быть непосредственно сопоставимы и могут быть интерпретированы в абсолютных единицах. Вплоть до того времени люди были вынуждены довольствоваться электроскопами с позолотой, и действительно, было невозможно изобрести точные *измерительные* приборы, пока не была полностью разработана система абсолютных единиц измерения. Работа по определению единиц измерения и воплощению их в подходящих стандартах была начата Британской ассоциацией, и именно в рамках Доклада этого Комитета Собранию в Данди в 1867 году впервые появилась статья Томсона об электрометрах.

Там было указано, что электрометр - это, по сути, инструмент для измерения разности электрических потенциалов между проводниками посредством воздействия электростатической силы. Именно на такое различие указывает электроскоп сусального золота для его золотых листьев и стержней, окружающих воздушное пространство, в котором они подвешены. Когда-то изготавливались электроскопы, эти стенки были сделаны из стекла, несовершенно покрытого, если вообще покрытого, проводящим материалом, и электроскоп был довольно неопределенным в своем действии. Инструмент также был сделан совершенно нечувствительным. Однако недавно его репутация была восстановлена, и он стал использоваться в качестве очень чувствительного индикатора воздействия радиоактивности.

Томсон описал в этой статье шесть видов электрометров собственного изобретения. Наиболее известными из них являются его квадрантный электрометр и его электрометры с притягивающим диском. Первое в настоящее время в той или иной форме можно найти в каждой лаборатории, и нет необходимости описывать его подробно. Действие осуществляется двумя проводниками — двумя парами противоположных секторов неглубокой горизонтальной цилиндрической коробки, полученной путем деления коробки на четыре части с помощью двух прорезей под прямым углом, — на наэлектризованный алюминиевый стержень, подвешенный на двухниточной подвеске внутри коробки, длина которой проходит вдоль одной из прорезей. Две пары противоположных секторов находятся на измеряемой разности потенциалов, и алюминиевая полоска, или "игла", каждым концом перемещается из сектора с более высоким потенциалом в сектор с более низким, и эти действия направлены на то, чтобы

предотвратить тенденцию полоски возвращаться в положение, в котором две нити находятся в одной плоскости. Таким образом, отклонение (измеряемое смещением отраженного луча света, используемого в качестве показателя) дает представление о величине разности потенциалов.

Электрификация "иглы" поддерживалась путем помещения квадратной коробки в наэлектризованную лейденскую банку, с внутренним покрытием которой контактирует платиновая проволока, в зависимости от того, от иглы до серной кислоты, содержащейся в банке. Весь аппарат был заключен в проводящий кожух, соединенный с землей. Это делало его действие совершенно определенным. Изменения этой электризации банки были показаны с помощью прилагаемого электрометра с притягивающим диском, принцип действия которого мы просто укажем.

Чувствительность квадрантного электрометра теперь значительно возросла за счет использования в качестве подвески одного кварцевого волокна. Изобретением этого волокна, которое является чрезвычайно прочным и, более того, настолько определенным по своим эластичным свойствам, что после скручивания оно сразу же возвращается в свое прежнее нулевое состояние, мистер К. В. Бойз во много раз повысил деликатность всех видов подвесных индикаторов. Но следует помнить, что электрометр Долезалека, чувствительность которого в несколько сотен или более раз превышает чувствительность бифилярного прибора, стал возможен только благодаря его предшественнику.

Электрометры с притягивающим диском просто измеряют либо взвешиванием, либо прогибом пружины силу притяжения между двумя параллельными дисками при разном потенциале. Из определения этой силы и измерения расстояния между дисками (или, лучше, изменения расстояния) можно определить разность потенциалов и получить для нее единицу измерения, которая находится в прямой и известной зависимости от обычных динамических единиц. "Абсолютный электрометр" Томсона был разработан специально для точных определений такого рода. Другая форма, называемая электрометром дальнего действия, была разработана для измерения потенциалов заряженных проводников в электрических машинах и лейденских банках.

Точные определения сопротивления искрообразованию между параллельными пластинами, заряженными в воздухе с разным потенциалом, были выполнены с помощью электрометров с притягивающим диском в ходе некоторых важных экспериментов, описанных в *Электростатике и магнетизме*. Эти результаты часто упоминались в более поздних исследованиях.

Для наблюдения за электрификацией лейденской банки прибора quadrant использовался небольшой электрометр с притягивающим диском, как указано выше, и была добавлена небольшая индукционная машина, вращая которую оператор мог восполнить потерю заряда банки.

Эта электрическая машина была примером устройства, основанного точно на том же принципе, что и современные машины Воссса или Уимшерста. В нем с помощью набора движущихся носителей, на которые воздействуют проводники, заряды последних были увеличены в соответствии с принципом сложных процентов, которому препятствовала только утечка в воздух или через опоры. Несколько форм этой машины, построенной по тому же принципу, были сконструированы Томсоном и описаны в 1868 году; но впоследствии он обнаружил, что он был

предвосхищен К. Ф. Варли в 1860 году. Еще позже было обнаружено, что аналогичный инструмент был изготовлен столетием раньше Николсоном и назван им "Вращающимся дублером".

Можно только упомянуть эксперименты, которые Томсон проводил с атмосферным электричеством в башне старого колледжа и с помощью портативных электрометров в Арране и других местах. Они, несомненно, привели к некоторым усовершенствованиям электрометров, которые он сделал, к методу приведения сопла капельницы для воды или точки на переносном электрометре к потенциалу воздуха путем индуктивного воздействия на струю капель воды в одном случае или на частицы дыма от горящей спички в другом. Он изобрел самодействующую машину, приводимую в действие потоком водяных капель, для накопления электрических зарядов по принципу вращающегося удвоителя. По-видимому, именно это привело к появлению машин с вращающимися опорами, о которых говорилось выше.

Математическая теория магнетизма, которую Томсон изложил в 1849 году в *филос. Trans. R.S.*, был, когда его дополнили различные более поздние статьи, систематическим обсуждением всего предмета, включая электромагнетизм и диамагнетизм. В значительной степени путь, пройденный статьей 1849 года, был пройден ранее Пуассоном и частично Мерфи и Грином; но Томсон заявил, что одной из главных целей его мемуаров было формальное построение теории без ссылки на два магнитных флюида, посредством которых до сих пор были выражены факты эксперимента и выводы теории. Однако он счел удобным ввести идею положительной и отрицательной магнитной материи (притягивающей и отталкивающей, как заряды положительного и отрицательного электричества), которые следует рассматривать как всегда присутствующие в равных количествах не только в магните в целом, но и в каждой его части; и на первый взгляд это может показаться возвращением к магнитным флюидам. Но в целом это скорее сводится к представлению о магните как о скоплении дублетов магнитной материи (то есть очень близких, равных и неразделимых зарядов двух видов материи), расположение которых может быть изменено действием магнитной силы. Эта идея изложена сейчас во всех книгах по магнетизму и электричеству. Не может быть никаких сомнений в том, что систематическое изложение предмета Томсоном, а также теоремы и идеи магнитной силы и магнитной проницаемости, с помощью которых он четко определил количественные значения ясных и, следовательно, математических представлений Фарадея, оказали большое влияние на прогресс науки об электричестве, что привело, с одной стороны, к появлению электромагнитных теорий Максвелла, а с другой - к современным исследованиям магнитных свойств железа и к правильным идеям, которые сейчас преобладают в отношении конструкции динамоэлектрических машин и двигателей.

ГЛАВА XII

ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ

Со студенческих времен на протяжении всей своей жизни лорд Кельвин проявлял живой интерес к геологическим вопросам. Он всегда был активным членом Геологического общества Глазго и был его президентом в течение двадцати одного года (1872-1893). Распределение тепла в веществе земли было темой его первой диссертации в качестве профессора

натурфилософии; а ранее, будучи студентом, он написал эссе на тему "Фигура Земли", за которое был награжден Золотой медалью университета. Он никогда не переставал размышлять над проблемами земной физики и много писал на эту тему. Его статьи можно найти в качестве приложений к "*Натурфилософии*" Томсона и Тейта, а также в vol. ii из его *популярных лекций и выступлений*, который посвящен геологии и общей физике.

Его выводы относительно возраста земли были упомянуты в предыдущей главе. Первое упоминание на эту тему содержалось (см. стр. 65 выше) в его первой диссертации "*О распределении калорий в корпусе земли*"; но он снова вернулся к ней в сообщении, направленном Королевскому обществу Эдинбурга в декабре 1865 года и озаглавленном "*Доктрина однородности в геологии кратко опровергнута*". 27 февраля 1868 года он выступил перед Геологическим обществом Глазго с речью, озаглавленной "*О геологическом времени*", в которой подчеркивалась необходимость ограничения геологических и других изменений почти бесконечно малой долей от требуемых в то время огромных периодов, что вызвало много дискуссий.

Обращение началось с протеста против старого униформистского взгляда на геологические изменения, выраженного Плейфером в его *Иллюстрациях к теории Хаттона*. Первое возражение, выдвинутое против идеи о том, что "в продолжении различных видов животных и растений, населяющих землю, мы не различаем ни начала, ни конца; в движениях планет, где геометрия так далеко завела глаз, как в будущее, так и в прошлое, мы не обнаруживаем никаких признаков ни начала, ни окончания нынешнего порядка", состоит в том, что стабильность движений небесных тел, на которую делается ссылка в этом утверждении, основана на том, что по сути является приблизительным расчетом, который намеренно не учитывает сопротивление трению.

Он указывает, например, что трение, сопровождающее относительное движение вод земли и суши, сопровождается выделением тепла, и что, согласно доктрине сохранения энергии, тепло не может быть произведено без исчезновения эквивалентного количества энергии либо движения, либо положения. Главным источником этой энергии является вращение Земли. Поскольку земля вращается под действием Луны, а приливный сфероид — то есть форма земли, искаженная скоплением воды во время приливов, — остается в целом неподвижным по отношению к Луне, твердое вещество земли вращается под действием распределения воды, удерживаемого более или менее неподвижно Луной, подобно маховику под действием неподвижной ленты трения вокруг его обода. Тогда точно так же, как закрепленная лента тормозит маховик, так и земля должна быть замедлена в своем вращении этим водяным тормозом. При вращении земли имеется запас кинетической энергии, который, по приблизительным оценкам, не истощился бы менее чем за десять миллионов миллионов лет, хотя и постоянно потребляется за счет трения или других воздействий со скоростью в миллион лошадиных сил; так что никакая немедленная катастрофа, подобная той, в которую мы были бы вовлечены из-за остановки или значительного замедления вращательного движения земли, невозможна. Но Томсон указал, что наилучшие результаты астрономических наблюдений показывают, что земля через сто лет отстала бы от идеального хронометра, с которым ее вращение соответствовало началу отсчета времени, примерно на двадцать секунд. Тенденция состоит в том, чтобы заставить землю вращаться медленнее, а Луну увеличивать свое расстояние и медленнее двигаться по своей орбите, но с результирующим эффектом совпадения периода вращения Земли с периодом обращения Луны вокруг земли. Однако после

того, как это совпадение будет достигнуто, солнечные приливы будут стремиться заставить Луну падать по направлению к земле.

Если тогда земля вращается все медленнее с течением времени в настоящее время, то в прошлом она, должно быть, вращалась быстрее. Тысячу миллионов лет назад, при нынешних темпах замедления, земля, должно быть, вращалась на одну седьмую своей скорости быстрее, чем она вращается сейчас, и это дало бы центробежную силу на поверхности тысячу миллионов лет назад, большую, чем центробежная сила в настоящее время, в соотношении 64 к 49. Следовательно, очевидно, что земля должна была затвердеть гораздо позже той эпохи, когда она вращалась гораздо ближе к той угловой скорости, которую имеет сейчас; в противном случае фигура земли намного больше отклонялась бы от сферической формы, чем это происходит на самом деле. С другой стороны, сто миллионов лет назад центробежная сила составляла бы всего три процента. больше, чем сейчас, и консолидация земли в тот менее отдаленный период придала бы земле форму, не сильно отличающуюся от той, которой она обладает сейчас. Таким образом, аргумент в пользу замедления приливов сократил бы время, доступное для геологических и биологических изменений, до чего-то ненамного превышающего сто миллионов лет, возможно, и меньше.

Второй аргумент в пользу ограничения времени, доступного для таких процессов, основан на солнечном тепле. Солнце нельзя рассматривать как чудесное тело, производящее свой свет и тепло из ничего. Изменения в строении солнца должны происходить постоянно, чтобы объяснить его огромное излучение энергии в космос, излучение, лишь бесконечно малая часть которого принимается телами солнечной системы и еще более ничтожная часть землей. Воздействие солнечного света и тепла на землю показывает, каким огромным должно быть количество энергии, теряемой солнцем за год. Как следует учитывать эту потерю энергии? Каково физическое изменение, которое приводит к этому? В 1854 году Томсон выдвинул теорию о том, что солнечное тепло сохраняется за счет падения метеоров на поверхность солнца, но впоследствии он счел нужным отказаться от этой точки зрения. Гельмгольц отстаивал теорию о том, что солнце - это тело, нагревающееся за счет объединения составляющих его веществ под действием их взаимного притяжения, процесса, который, хотя солнце сейчас представляет собой сплошную массу, следует рассматривать как все еще продолжающийся. Легко рассчитать истощение потенциальной энергии, вызванное объединением вещества Солнца из универсального рассеяния в бесконечном пространстве в сферу однородной плотности нынешнего размера Солнца. В результате получается примерно столько же энергии, сколько было бы произведено при сжигании семи миллионов миллионов миллионов тонн угля. Количество излучения, излучаемого за каждый час, примерно такое же, какое могло бы образоваться при сжигании примерно девяти тонн угля каждый час на каждом квадратном ярде поверхности солнца. Несомненно, что солнце должно все еще сжиматься, и если оно сжимается настолько, чтобы просто восполнить этот расход за счет дальнейшего истощения потенциальной энергии, связанной с более плотным скоплением вещества, его радиус должен уменьшаться в течение каждого года на целых 130 футов.

Количество энергии, генерируемой слиянием вещества Солнца в результате всемирного распространения до размеров, которые солнце имеет в настоящее время, всего примерно в 13 000 000 раз превышает количество, излучаемое сейчас в год. В работе Томсона используется оценка Пуье энергии, излучаемой в секунду, и это число увеличивается до 20 000 000. Принимая последнюю оценку, всей потенциальной энергии, израсходованной в результате

конденсации массы Солнца до однородной плотности, хватило бы всего на 20 000 000 лет запаса. Но солнце, несомненно, имеет гораздо большую плотность в центральных частях, чем вблизи поверхности, и поэтому потребляемая энергия должна быть намного больше указанной выше. Это увеличит количество предусмотренных лет. С другой стороны, в процессе конденсации было бы рассеяно значительное количество энергии, и это сократило бы расчетный период излучения. Томсон предполагает, что возможной оценкой является 50 000 000 или 100 000 000 лет.

Не исключено, что скорость излучения в прошлом, когда солнце еще и близко не конденсировалось до своих нынешних размеров, была настолько меньше, чем сейчас, что предложенный выше период, возможно, придется значительно увеличить. В последние годы был выдвинут предположение о другом источнике излучения, который, по-видимому, рассматривается некоторыми авторитетными источниками как вероятный, если не определенный, — присутствию радиоактивных веществ на солнце. Насколько нам известно, лорд Кельвин не признавал, что этот источник излучения заслуживает рассмотрения; но, конечно, учитывая его существование в объеме, сопоставимом с энергией, получаемой в результате конденсации массы Солнца, "возраст солнечного тепла" должен был бы быть очень значительно увеличен. Однако это вопросы, на которые может быть пролит дальнейший свет по мере продвижения исследований радиоактивности. Во время своей последней болезни лорд Кельвин был занят обсуждением изменений энергии в газообразном или частично газообразном шаре, медленно остывающем и сжимающемся при этом; и вскоре будет опубликована посмертная статья на эту тему, которая, возможно, будет содержать дополнительную информацию по этому вопросу физики Солнца.

Но Томсон выдвинул третий аргумент в статье о геологическом времени, который всегда считался наиболее важным. Это вытекает из факта, установленного многочисленными наблюдениями, что температура в земной коре повышается от поверхности внутрь; и что, следовательно, земля должна постоянно терять тепло за счет теплопроводности изнутри. Если предположить, что земля имела одинаковую температуру в какой-то период прошлого времени и находилась в расплавленном состоянии, и сделать определенные предположения относительно проводящей способности и температуры плавления ее материала, то можно рассчитать время охлаждения до тех пор, пока градиент температуры на поверхности не приобретет свое нынешнее значение. Это было сделано Томсоном в статье, опубликованной в *Transactions, R.S.E.*, в 1862 году. Мы предлагаем дать здесь краткий очерк его аргументации, которая вызвала большой интерес и стала причиной некоторых споров.

Чтобы понять этот аргумент, читатель должен иметь в виду некоторые фундаментальные факты о потоке тепла в твердом теле. Пусть он представит себе плиту из любого однородного материала, скажем, песчаника или мрамора, две параллельные грани которой постоянно поддерживаются при двух разных температурах, равномерных по каждой грани. Например, пар может непрерывно подаваться на одну грань, в то время как ледяная вода течет по другой. Тепло будет проходить по плите от более горячей грани к более холодной. Будет обнаружено, что скорость теплового потока на единицу площади поверхности, то есть на квадратный сантиметр или квадратный дюйм, пропорциональна разнице температур в плите на двух гранях и обратно пропорциональна толщине плиты. Другими словами, она пропорциональна падению температуры от одной грани к другой, взятому на единицу толщины, то есть "градиенту температуры" от одной грани к другой. Более того, сравнивая поток в одном веществе с потоком

в другом, мы обнаруживаем, что он различается в разных веществах при одном и том же градиенте температуры. Таким образом, в конечном итоге мы получаем тепловой поток через единицу площади плиты, который равен градиенту температуры, умноженному на число, зависящее от материала: это число называется "проводимостью" вещества.

Теперь, бурения, сделанные в земле, показывают, что температура повышается внутри, и то же самое показывают более высокие температуры, обнаруженные в более глубоких угольных шахтах. С помощью термометров, погруженных на разную глубину, была определена скорость повышения температуры с глубиной. Аналогичные наблюдения показывают, что суточные и годовые колебания температуры, вызванные сменой дня и ночи, лета и зимы, проникают лишь на сравнительно небольшую глубину под поверхность — три или четыре фута в первом случае, шестьдесят или семьдесят во втором. Не принимая во внимание эти изменения, поскольку среднее значение их воздействия за значительный промежуток времени должно быть равно нулю, мы имеем на земле тело, в каждой точке земной коры которого наблюдается градиент повышения температуры внутрь. Величину этого значения можно принять за один градус по шкале Фаренгейта на каждые 50 футов спуска. Этот уклон неравномерен, но уменьшается на больших глубинах. Предполагая, что материал одинакового качества с точки зрения теплопроводности, математическая теория охлаждающего шара из твердого материала (или прямого бруска, который не теряет тепло со своих сторон) дает при определенных предположениях градиенты на разных глубинах. Уклон поверхности в 1°F . на расстоянии 50 футов может быть принят за удержание на протяжении 5000 футов или 6000 футов и более.

Этот градиент снижения температуры снаружи неизбежно приводит к выводу, что тепло должно постоянно поступать из недр земли к поверхности. Это так же верно, как то, что тепло течет по кочерге, один конец которой находится в огне, от нагретого конца к другому. Тепло, которое достигает поверхности земли, излучается в атмосферу или уносится конвекционными потоками; нет никаких сомнений в том, что оно теряется на земле. Таким образом, земля должна остывать со скоростью, которая может быть рассчитана на основе определенных допущений, и на основе этих допущений возможно произвести обратный расчет и определить интервал времени, который должен был пройти с тех пор, как земля только начала остывать из расплавленного состояния, когда, конечно, жизнь не могла существовать на ее поверхности, и те геологические изменения, которые произвели так много, едва ли могли начаться.

Рассматривая шар из однородного материала большого радиуса, который изначально имел одну температуру, а в определенный момент его поверхность внезапно нагрелась, скажем, до температуры тающего льда, при которой поверхность сохранялась всегда после этого, мы можем найти, с помощью математической теории теплового потока Фурье, градиент температуры в любое последующее время для точки на поверхности или на любом заданном расстоянии внутри нее. Для точки на поверхности этот градиент просто пропорционален начальной равномерной температуре и обратно пропорционален квадратному корню из произведения "диффузионной способности" материала (отношения электропроводности к удельной теплоемкости) на интервал времени, прошедший с момента начала охлаждения. Принимая фут за единицу длины и год за единицу времени, мы находим, что коэффициент диффузии поверхностных слоев равен 400. Если мы примем начальную температуру за 7000 градусов по Фаренгейту — что достаточно высоко для плавления породы — и возьмем промежуток времени, прошедший за 100 000 000 лет, мы получим на поверхности градиент, приблизительно равный тому, который существует сейчас. Большой интервал времени дал бы

более низкий градиент, меньший интервал дал бы более высокий градиент, чем тот, который существует в настоящее время. Более низкая начальная температура потребовала бы меньшего интервала времени, более высокая начальная температура - более длительного интервала для текущего градиента.

При начальной температуре 7000 градусов по Фаренгейту интервал в 4 000 000 лет дал бы уклон поверхности в 1 ° F. на 10 футов. Таким образом, исходя из сделанного предположения, поверхностный градиент температуры уменьшился с $\frac{1}{10}$ до $\frac{1}{50}$ примерно за 96 000 000 лет. Через 10 000 лет с начала похолодания градиент температуры составит 2 ° F. на фут. Но, как показал Томсон, такой большой градиент не привел бы к какому-либо ощутимому повышению температуры поверхности, поскольку "излучение от земли и атмосферы в космос почти наверняка было бы настолько быстрым", чтобы предотвратить это. Отсюда он сделал вывод, что проводимое тепло даже в тот ранний период не могло ощутимо повлиять на общий климат.

Два возражения (помимо уже указанных предположений) легко придут в голову любому, кто рассматривает эту теорию, и на них Томсон ответил предвосхищением. Первая заключается в том, что никакое естественное воздействие не могло бы мгновенно нагреть поверхность равномерно нагретого шара до температуры на 7000 ° ниже и поддерживать ее такой до сих пор. В ответ на это Томсон настаивал на том, "что большая масса расплавленной породы, свободно обнаженная нашей земле и небу, после того, как она однажды покроется коркой, через несколько часов, или через несколько дней, или, самое большее, через несколько недель, станет настолько холодной, что по ней можно будет безнаказанно ходить. Следовательно, через 10 000 лет, или, действительно, я могу сказать, через один год, его состояние будет практически таким же, как если бы фактическое понижение температуры, испытываемое поверхностью, было произведено в одно мгновение и с тех пор поддерживалось постоянным". Другое возражение заключалось в том, что земля, вероятно, никогда не была равномерно нагретым твердым телом на 7000 ° F выше нынешней температуры поверхности, как предполагалось для целей расчета. На это Томсон отвечает, приводя основания полагать, что "земля, хотя однажды вся расплавилась или расплавилась по всей своей поверхности, по всей вероятности, действительно стала твердой при температуре плавления на всем протяжении или на всем протяжении внешнего слоя, который был расплавлен; и только после того, как затвердевание было таким образом завершено или почти завершено, поверхность начала остывать".

Томсон был склонен полагать, что температура в 7000 ° F. вероятно, это слишком высоко, и результаты экспериментов по плавлению базальта и других горных пород привели его к тому, что он предпочел значительно более низкую температуру. Это, как уже указывалось, дало бы меньшее значение возраста земли. В письме на эту тему, опубликованном в *Nature* (том 51, 1895), он заявляет, что "не склонен сильно отличаться" от оценки в 24 000 000 лет, основанной мистером Кларенсом Кингом (*Американский научный журнал*, январь 1893 г.) на экспериментах по изучению физических свойств горных пород при высоких температурах.

Следует отметить, что сделанные выше предположения о том, что физические константы материала постоянны по всей земле и при любых температурах, по общему признанию, далеки от истины. Тем не менее Томсон твердо придерживался мнения, что неопределенность данных может в лучшем случае увеличить возраст Земли до некоторого значения между 20 000 000 и 200 000 000 лет, и что невозможно допустить чрезвычайно длительные периоды, которые

геологи и биологи обычно требовали для описания изменений земной поверхности и развития ее флоры и фауны.

В журнале *Nature* от 3 января 1895 года профессор Джон Перри предположил, что, весьма возможно, электропроводность материала, составляющего недр земли, значительно выше, чем у поверхностных слоев. Если бы это было так, то, как можно без труда показать, достижение нынешнего градиента было бы очень сильно замедлено, и, следовательно, возраст земли соответственно увеличился бы. Затем возник и был обсужден вопрос о том, являются ли горные породы и другие материалы при высоких температурах более или менее проводящими, чем при низких температурах, и были начаты и проведены эксперименты по этому вопросу. В целом, имеющиеся данные, по-видимому, свидетельствовали о том, что проводимость большинства веществ уменьшается, а не увеличивается при повышении температуры, и, следовательно, в той мере, в какой это происходило, доказательства были против предположения профессора Перри. С другой стороны, он утверждал, что внутренняя часть земли может представлять собой массу большой жесткости, частично твердую и частично текучую, обладающую "квазипроводимостью", которая может значительно увеличить период охлаждения. Этот вопрос сложен как с математической, так и с физической точки зрения, и необходимы дальнейшие исследования, особенно поведения материалов при огромных напряжениях, которые они, несомненно, выдерживают в недрах земли.

После публикации статьи о геологическом времени ответ на нее был дан профессором Хаксли в обращении к Лондонскому геологическому обществу, произнесенном 19 февраля 1869 года. Он взял на себя роль защитника, нанятого для защиты геологии от того, что, по-видимому, было расценено как необоснованная атака, предпринятая человеком, который не имел права высказывать свое мнение по геологическому вопросу. Ибо после долгой и красноречивой "мольбы" он завершает свое выступление словами: "Мои функции как вашего адвоката подошли к концу. Я говорю с большей искренностью, чем простой адвокат, когда выражаю убеждение, что дело против нас полностью раскрыто. Призывы к реформе, раздававшиеся извне, излишни, поскольку мы долгое время реформировались изнутри со всей необходимой скоростью; и критическое изучение оснований, на которых против нас было выдвинуто очень серьезное обвинение в противодействии принципам натуральной философии, скорее показывает, что мы проявили мудрую проницательность, отказавшись вмешиваться в наш фундамент по просьбе первого прохожего, которому покажется, что наш дом построен не так хорошо, как могло бы быть". На это Томсон ответил в обращении, озаглавленном "О геологической динамике", также произнесенном в Геологическом обществе Глазго в апреле. 5, 1869; и к этому, с обращением профессора Хаксли, следует отсылать читателя по поводу возражения, выдвинутого против аргументов Томсона, и ответов, которые были немедленно получены. Здесь не место обсуждать этот вопрос, но можно сослаться на интересную статью на эту тему в *Glasgow Herald* от 22 февраля 1908 г. профессора Дж. У. Грегори, в которой предложение профессора Перри о более близком подходе к однородности температуры внутри земли, чем Томсон считал возможным, приветствуется как возможное продление доступного промежутка времени до периода, достаточного для всех целей. По мнению профессора Грегори, "Лорд Кельвин в одном отношении проявил большую проницательность, чем Хаксли, который, имея в виду возможные изменения в скорости вращения Земли, или в выделяемом солнцем тепле, или в охлаждении земли, заявил, что геологи - это галлы, "которых ничто из этого не волнует". Постоянно растущая школа геологов сейчас очень интересуется этими вопросами и почитает лорда Кельвина как одного из основоположников геологии внутренней части земли".

В конце концов, эта проблема не из тех, которыми должен заниматься геолог или биолог в одиночку, но должна быть решена, насколько это вообще возможно решить, путем рассмотрения всех относящихся к делу свидетельств, с какой бы стороны они ни исходили. В наши дни ученым не пристало замыкаться в своих специальных отделах и говорить в отношении отраслей науки, которые имеют дело с другими аспектами природы и другими проблемами прошлого, настоящего и будущего той же самой земли, на которой все живут и работают, что их "ничего из этого не волнует". Это отголосок старого духа, еще не умершего, который причинил много вреда прогрессу науки. Разделение науки на отделы неизбежно, поскольку специализация обязательна; но тем более необходимо помнить, что установленные разделения более или менее произвольны и что нет абсолютно никаких границ, которые следовало бы охранять и обеспечивать. Химия, физиология и физика не могут быть отгорожены друг от друга без ущерба для всех; и геология сильно пострадала из-за того, что ее рассматривали по существу как раздел естественной истории, приверженцев которого не интересуют соображения естественной философии. Достойные вопросы лорда Кельвина остались без ответа. "Кто обитатели "нашего дома", а кто "прохожий"? Разве геология не является разделом физической науки? Разве исследования, экспериментальные и математические, подземной температуры не следует рассматривать как неотъемлемую часть геологии?... Что касается меня, то я стремлюсь к тому, чтобы геологи считали меня не простым прохожим, а человеком, постоянно интересующимся их великим предметом и стремящимся любым способом, каким бы незначительным он ни был, помочь им в поисках истины".

ГЛАВА XIII

КОМИТЕТ БРИТАНСКОЙ АССОЦИАЦИИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СТАНДАРТАМ

Когда профессор Томсон начал свою преподавательскую работу в Университете Глазго, как уже было замечено, существовала большая расплывчатость в определении физических величин. Немногие из формальных определений единиц измерения, которые сейчас можно найти на страницах каждого начального учебника, были сформулированы в рамку, и возникло много путаницы в отношении величин, по существу отличающихся друг от друга, путаницы, от которой теперь, по крайней мере в некоторой степени, можно защититься, приняв определенную единицу с особым названием для каждой измеряемой величины. Таким образом, скорость работы, или активность, путали с выполненной работой; условие максимальной активности в цепи батареи или динамо-машины часто цитировалось как условие наибольшей эффективности, то есть наибольшей экономии энергии, хотя именно при этом половина доступной энергии расходовалась впустую.

Отчасти как следствие этой расплывчатости спецификации, существовала большая нехватка знаний о значениях физических констант; ибо без точных определений подлежащих определению величин, таких определений, которые указывали бы единицы для их измерения, связанные с обычными динамическими единицами в соответствии с последовательной схемой, было невозможно разработать удовлетворительные экспериментальные методы, позволяющие сделать для электричества и магнетизма то, что было сделано Реньо и другими для тепла.

Первые шаги к построению полной системы единиц для количественного измерения магнитных и электрических величин были предприняты Гауссом в его знаменитой работе под названием *Intensitas vis magneticæ terrestris ad mensuram absolutam revocata*, опубликованной в 1832 году. В этом он показал, как магнитные силы могут быть выражены в абсолютных единицах и, таким образом, связаны с абсолютными динамическими единицами, которые Гаусс в той же статье основывал на выбранных фундаментальных единицах длины, массы и времени. Таким образом, современная система абсолютных единиц динамических величин и ее распространение на магнетизм обязаны практической проницательности великого математика, а не экспериментаторам или "практикам" того времени.

Методы измерения электрических величин в абсолютных единицах были описаны У. Вебером в частях II и III его книги *"Электродинамические исследования"*, опубликованной в 1852 году. Это были большие шаги вперед, которые сравнительно облегчили дальнейший прогресс в науке абсолютных измерений. Но они оставались единственными предпринятыми шагами, пока Комитет Британской ассоциации не начал свою работу. Мы уже упоминали (стр. 74-76) об огромной важности этой работы не только для практического применения, но и для развития науки. Но это была не та задача, которая поражала воображение или вызывала удивление у толпы. Поскольку разработка стандартов стойкости, например, требовала длительных и утомительных исследований влияния примесей на стойкость металлов, а также изменения стойкости, вызванного изменением температуры и течением времени. Затем пришлось искать сплавы, которые оказывали бы незначительное температурное воздействие и которые были бы стабильны и долговечны по всем своим свойствам.

Открытия экспериментатора, который находит новый элемент с доселе невиданными свойствами, привлекают внимание всего мира, и слава об этом достижении заслуженно велика. Но терпеливая, кропотливая работа, которая дает универсальную систему единиц и связанных с ней стандартов, и которая позволяет такому великому физическому предмету, как электричество и магнетизм, подняться от простого перечисления качественных результатов до науки о самых тонких и точных измерениях и найти ее практическое применение во всех делах повседневной жизни и коммерции, в равной степени заслуживает восхищения и благодарности человечества. Тем не менее, это получает мало признания или вообще не получает его.

Создание стандарта сопротивления было первой задачей, поставленной комитетом; но необходимо было также определить другие единицы измерения, например количество электроэнергии, напряженность электрического поля и разность потенциалов, и разработать методы их использования в экспериментальной работе. Было бы неуместно пытаться обсуждать здесь эти единицы, но некоторое представление о том, каким образом их определения основаны на динамических концепциях, можно получить из одного или двух примеров. Поэтому мы опишем два простых эксперимента, которые проиллюстрируют эту динамическую основу. В главе XI был дан отчет о серии электрометров, изобретенных Томсоном для измерения разности электрических потенциалов. Все они действуют путем оценки в терминах обычных динамических единиц силы, толкающей наэлектризованное тело из места с более высоким потенциалом в место с более низким потенциалом.

Некоторое указание на значение электрических величин было дано в главе IV. Разница электрического потенциала между двумя точками в электрическом поле была там определена как динамическая работа, совершаемая при переносе единицы положительного электричества

против сил поля из точки с более низким потенциалом в точку с более высоким. Теперь по определению единичного количества электричества, данному в теории электричества, — то количество, которое, сконцентрированное в точке на единичном расстоянии от равного количества, также сконцентрированного в точке, отталкивается с единичной силой — мы можем найти, путем простого эксперимента подвешивания двух пробковых шариков (или, лучше, двух полых позолоченных шариков одинакового размера) на двух тонких волокнах кварца, скажем, длиной в метр, наэлектризовывая два шарика, когда они соприкасаются, и наблюдая расстояние, на котором они затем подвешиваются, числовую величину в абсолютных единицах заряда электричества, и применить это для определения заряда на двух тонких кварцевых волокнах. большой сферический проводник и потенциал в точках его поля также выражены в абсолютных единицах. Если m - масса мяча, g сила тяжести в сантиметрах в секунду, то d - расстояние в сантиметрах. центров шариков на расстоянии друг от друга и l - длина в сантиметрах. что касается нити, то заряд, скажем, q , на каждом шарике легко определяется как

$$\sqrt{mgd^3} / \sqrt{4l^2 - d^2}.$$

Таким образом, заряд определяется в абсолютных единицах измерения сантиметр-грамм-секунда в единицах массы m , полученных обычным взвешиванием, и l и d , полученных простым и точным измерением.

Если теперь убрать один из шариков, не разряжая другой, и поместить последний в поле действия большого наэлектризованного сферического проводника, волокно отклонится от вертикали под действием силы, действующей на шарик. Пусть эти два центра будут теперь на одном уровне. Эта сила определяется сразу углом отклонения (который легко наблюдать), зарядом шара и значением m . Напряженность электрического поля получается путем деления значения силы на q . Напряженность поля, умноженная на D , расстояние друг от друга в сантиметрах. центров шара и проводника, дает потенциал в центре шара в единицах CGS. Повторное умножение на D дает заряд на проводнике.

Когда он сделал свой первый доклад в 1862 году (собранию в Кембридже), комитет состоял из профессоров А. Уильямсона, К. Уитстоуна, У. Томсона, У. Х. Миллера, доктора А. Маттиссена и мистера Ф. Дженкина. На следующей встрече в Ньюкасле он был дополнен добавлением господ дж. Бальфур Стюарт, К. В. Сименс, профессор Клерк Максвелл, доктор Джоуль, доктор Эссельбах и сэр Чарльз Брайт. Обязанность, которая была возложена на комитет, заключалась в создании подходящего стандарта сопротивления. Ссылка на приведенный в главе X выше отчет о получении того, что стало называться электромагнитной единицей разности потенциалов, или электродвижущей силой, с помощью простой магнитоэлектрической машины — диска, вращающегося в однородном магнитном поле, или описанных там простых направляющих, ползунка и устройства магнитного поля — покажет, как из этой единицы и электромагнитной единицы тока (также определенной там) определяется единица сопротивления. Это сопротивление цепи ползуна, направляющих и соединительного провода,

когда с помощью этой электромагнитной единицы электродвижущей силы пропускается единица тока.

Это был один из ясных и определенных способов определения единицы тока и достижения важной цели - соединения блоков таким образом, чтобы скорость работы в цепи или энергия, затраченная за любое время, были сразу выражены в обычных динамических единицах активности или энергии. Значительное количество предложений было обсуждено комитетом; но в конечном итоге было решено взять указанную здесь основу и реализовать стандарт сопротивления в материале с постоянными и долговечными свойствами, который должен иметь некоторое простое кратное единице сопротивления значение в системе динамических единиц, основанной на сантиметре как единице длины, грамме как единице массы и секунде как единице времени — так называемой системе C.G.S. Сравнение различных доступных металлов и сплавов было наиболее важной, но чрезвычайно трудоемкой серией исследований, выполнявшихся в основном доктором Маттиссеном и профессором Уильямсоном.

Профессор Томсон предложил комитету знаменитый метод определения сопротивления цепи путем вращения катушки, которая образует основную часть цепи, вокруг вертикальной оси в магнитном поле Земли. Отчет об экспериментах, проведенных с использованием этого метода, содержится в Отчете за 1863 год. Они были проведены в Королевском колледже Лондона, где Максвелл в то время был профессором экспериментальной физики, Максвеллом, Бальфуром Стюартом и Флимингом Дженкином. Теоретическое обсуждение и описание экспериментов было написано Максвеллом, детали аппарата были описаны Дженкином.

Принцип метода, по существу, тот же, что и у простой магнитоэлектрической машины, о которой только что говорилось. Два параллельных мотка проволоки были намотаны в каналы, вырезанные вокруг латунных колец, которые, однако, были пересечены пазами, заполненными вулканитом, чтобы предотвратить циркуляцию индуцированных токов в латуни. Эти катушки были установлены в вертикальном положении и могли приводиться в движение как жесткая система с постоянной измеряемой скоростью вокруг вертикальной оси, проходящей через центр системы. Между катушками в этом центре на устойчивой подставке была подвешена маленькая магнитная игла на одном шелковом волокне; а окружающий экран предохранял иглу и подвеску от воздействия потоков воздуха.

Концы катушки были соединены вместе так, что вся она вращалась как замкнутая цепь вокруг вертикальной оси. Когда система катушек располагалась под прямым углом к магнитному меридиану, через нее проходила магнитная индукция величиной AN , где A обозначает эффективную площадь катушек, а H - горизонтальную составляющую магнитного поля Земли. На один полуоборот катушка поворачивалась относительно этой магнитной индукции, и при вращении катушки генерировался индуцированный ток, который в любой момент зависел от скорости изменения магнитной индукции в данный момент, от индуктивной электродвижущей силы, обусловленной изменением тока в самой катушке, и от сопротивления цепи. Таким образом, периодический ток протекал в одном направлении *относительно катушки* на один полуоборот от положения, перпендикулярного магнитному меридиану, и в противоположном направлении на следующем полуобороте. Но поскольку положение катушки менялось на каждые пол-оборота, как и ток в ней, ток протекал в целом в одном и том же среднем направлении относительно стрелки и, если бы не самоиндукция, всегда имел бы максимальное значение, когда плоскость катушки находилась в магнитном меридиане.

Стрелка отклонялась, как это было бы при определенном среднем токе, и отклонению противодействовало действие горизонтального магнитного поля Земли H . Но это было поле, создаваемое катушкой при ее вращении, и поэтому (за исключением небольшого слагаемого, зависящего от поворота катушки в поле иглы) значение H не появилось в результате и не требовало, чтобы его знали.

Полные подробности теории этого метода и экспериментов, проведенных для его проверки, можно найти в различных мемуарах и трактатах²³; но здесь должно быть достаточно указать, что сопротивление катушки определялось таким образом с помощью большой серии экспериментов, до и после каждого из которых сопротивление сравнивалось с сопротивлением немецко-серебряного стандарта. Таким образом, сопротивление этого стандарта стало известно в абсолютных единицах, и можно было изготовить его копии, кратные или субмноженные.

На основе этих экспериментов было сконструировано устройство под названием B.A. unit, которое должно было содержать 10^9 электромагнитных единиц сопротивления C.G.S., и вскоре его копии можно было найти почти во всех физических лабораториях мира. Блоки сопротивления были сконструированы различными производителями, в которых катушки были кратны единице измерения ВА, так что любое сопротивление в определенном диапазоне можно было получить, соединив эти катушки последовательно (что было легко сделать, удалив заглушки короткого замыкания), и, таким образом, абсолютные единицы электродвижущей силы тока и сопротивления вошли в общее употребление.

В 1881 году лорд Рэлей и профессор Шустер провели очень тщательное повторение экспериментов Британской ассоциации с тем же аппаратом в Кавендишской лаборатории и получили несколько иной результат. Они обнаружили, что предыдущий результат составлял около 1,17 процента. слишком мало. Затем лорд Рэлей провел независимую серию экспериментов тем же методом с улучшенным оборудованием и обнаружил, что этот процент ошибки должен быть увеличен примерно до 1,35.

Здесь можно заметить, что простая дисковая машина, иллюстрирующая абсолютную единицу электродвижущей силы Томсона, была использована Лоренцем для получения метода определения сопротивления, который в настоящее время признан лучшим из всех. Это изложено здесь в общих чертах, чтобы читатель мог получить некоторое представление о более поздней работе по этому очень важному вопросу; работе, которая является продолжением работы первоначального Комитета Британской ассоциации их преемниками. Схема состоит из стандартной катушки провода, концы которой выполнены соприкасающимися по окружности и вблизи центра диска, который расположен симметрично относительно цилиндрической катушки и внутри нее. По этой катушке от батареи подается ток и создает внутри катушки магнитное поле, силовые линии которого проходят поперек плоскости диска. Этот ток, или его измеренная доля, также пропускается через стандартную катушку. Теперь диск вращается с измеренной скоростью вокруг своей оси, так что электродвижущая сила, обусловленная ослаблением поля, имеет тенденцию создавать ток в стандартной катушке провода. Электродвижущая сила диска создана таким образом, чтобы противодействовать разности потенциалов между концами этой катушки из-за тока, так что ток не течет ни по диску, ни по проводам, соединяющим его со стандартной катушкой. Магнитное поле внутри катушки может быть рассчитано исходя из формы и размеров катушки и тока в ней (предполагается, что на

данный момент он известен), а электродвижущая сила диска получается исходя из его размеров, его скорости и напряженности поля. Но эта электродвижущая сила, которая пропорциональна току в катушке, равна произведению сопротивления провода и того же тока или известной его доли. Таким образом, ток появляется в обеих частях уравнения и гаснет, а значение сопротивления определяется в абсолютных единицах.

Лорд Рэлей получил с помощью этого метода результат, который показал, что единица Б.А. составляла 1,323 процента. слишком мал; и другими были проведены точные эксперименты с соответствующими результатами. Значения единиц измерения были согласованы Международными конгрессами как достаточно точные для общей работы, и с этими единицами измерения все электрические исследования, где бы они ни проводились, доступны для использования другими экспериментаторами.

За последние сорок лет по этому вопросу была проделана огромная работа, и хотя значение практической единицы сопротивления — 10^9 единиц С.Ш., которые теперь называются "ом", — принято как установленное, и копии теперь можно получить в коробках с сопротивлением или отдельно, отрегулированные со всей необходимой точностью, в Национальной физической лаборатории и в Бюро стандартов в Вашингтоне и в других местах, проводятся эксперименты по точному измерению токов; при этом внимательно следят за стандартами, хранящимися в этих местах, чтобы увидеть, происходит ли какое-либо заметное изменение их сопротивления. место с течением времени.

Комитет Британской ассоциации также разработал полную систему единиц для всех электрических и магнитных величин и дал первое систематическое изложение их соотношений, то есть так называемых размерных уравнений величин. Это можно найти в работах, на которые уже делались ссылки (стр.251).

ГЛАВА XIV

БАЛТИМОРСКИЕ ЛЕКЦИИ

Балтиморские лекции были прочитаны в 1884 году в Университете Джона Хопкинса, вскоре после Монреальского собрания Британской ассоциации. Выбранным предметом была Волновая теория света; и идея, лежащая в основе курса, состояла в том, чтобы обсудить трудности этой теории с "профессорскими сокурсниками по физическим наукам". Стенографический отчет о курсе был составлен мистером А. С. Хэтуэузем и вскоре после этого опубликован. Лекции были переработаны лордом Кельвином, и книга, ныне известная как *Балтиморские лекции*, была опубликована всего двадцать лет спустя (в 1904 году) в издательстве Кембриджского университета. В таких мемуарах, как настоящие, абсолютно невозможно дать какой-либо отчет о дискуссиях, содержащихся в лекциях, опубликованных в настоящее время. Трудности, о которых идет речь, по большей части могут быть поняты только теми, кто знаком с волновой теорией света в деталях, и такие читатели, естественно, перейдут непосредственно к самой книге.

Однако на некоторые из трудностей часто ссылались в обычных лекциях лорда Кельвина, и все его бывшие ученики помнят, с каким воодушевлением он обсуждал очевидную аномалию среды, подобной светоносному эфиру, которая обладает такой огромной жесткостью, что (согласно теории упругого твердого тела) волна поперечных колебаний распространяется по ней со скоростью 3×10^{10} сантиметров (186 000 миль) в секунду, и все же, по-видимому, не создает препятствий медленному движению небесных тел. Ибо лорд Кельвин принял упругую твердотельную теорию распространения света как "единственную надежную основу для волновой теории света на современном уровне наших знаний" и отверг электромагнитную теорию (следует помнить, что его слова были произнесены в 1884 году), изложив свою твердую точку зрения о том, что электрическое смещение, перпендикулярное линии распространения, сопровождающееся магнитным возмущением под прямым углом к обеим, недопустимо.

И далее он говорит, что "когда у нас будет электромагнитная теория света", электрическое смещение будет рассматриваться как направленное в направлении распространения, с френелевскими колебаниями, перпендикулярными этому направлению. В предисловии, датированном январем 1904 года, признается недостаточность теории упругого твердого тела и снова упоминается вопрос об электромагнитной теории. Там он говорит, что целью Балтиморских лекций было выяснить, насколько явления света могут быть объяснены в рамках теории упругого твердого тела. И ответ таков: *"все немагнитное; ничего магнитного нет"*. Но он добавляет, что "так называемая электромагнитная теория света до сих пор нам не помогла" и что теперь перед физиками полностью стоит задача построения "всеобъемлющей динамики эфира, электричества и весомой материи, которая должна включать электростатическое взаимодействие, магнитостатическое взаимодействие, электромагнетизм, электрохимию и волновую теорию света".

Все это чрезвычайно интересно, поскольку, по-видимому, проясняет отношение лорда Кельвина к электромагнитной теории Максвелла, которая в настоящее время рассматривается большинством физиков как дающая в целом удовлетворительное объяснение распространения света, если не как динамическая теория в том смысле, который понимал лорд Кельвин. То, что существует электрическое смещение, перпендикулярное направлению распространения, и магнитное смещение (или движение), перпендикулярное обоим, по-видимому, доказано экспериментами Герца, и было обнаружено, что скорость распространения этих возмущений равна скорости света. Конечно, еще предстоит выяснить, в чем заключаются электрические и магнитные изменения и имеет ли эфир атомную структуру или нет. В направлении ответа на этот вопрос об электромагнитных предпосылках уже достигнут некоторый прогресс, главным образом Лармором. И, в конце концов, хотя мы можем воображать, что знаем что-то более определенное о динамических воздействиях на весомую материю, мы не совсем уверены, что это так: мы лучше знакомы с ними, вот и почти все. Мы знаем, например, что в каждой точке гравитационного поля земли мы можем установить вектор тяготения, или напряженность поля; поскольку частица материи подвергается ускорению в этом направлении. Но о *обосновании* этого действия мы ничего не знаем, или почти ничего. Итак, мы устанавливаем электрические и магнитные векторы в изолирующей среде, соответствующие электрическим и магнитным эффектам, которые мы можем наблюдать; и не будет преувеличением сказать, что в этом случае мы знаем едва ли меньше, чем в другом, о внутреннем механизме действия, эффекты которого мы видим.

Возвращаясь к трудности теории упругого твердого тела, заключающейся в том, что, хотя его жесткость огромна, оно не создает препятствий для планет и других небесных тел, которые движутся сквозь него, может быть интересно вспомнить, как лорд Кельвин обычно рассматривал это в своих элементарных лекциях. То же самое обсуждение было проведено на Вводной лекции в Балтиморе. Трудность не устраняется объяснением того, что происходит: ее можно преодолеть, показав, что аналогичная трудность существует при сопоставлении явлений, которые можно наблюдать каждый день, с такими обычными материалами, как смола или сапожный воск. Из кусочка такого воска можно сделать камертон или колокольчик, и тогда при ударе по нему прозвучит музыкальная нота определенной высоты. Это указывает на существование внутренних сил, называемых упругими, которые зависят от величины вызванной деформации, а не от скорости, с которой деформация увеличивается или уменьшается, как в случае с так называемыми "силами вязкости", которые обычно проявляются в таком материале. Но камертон или колокольчик, если оставить их лежать на столе, постепенно расплывшется в тонкий лист только под действием собственного веса. Здесь деформации противодействуют только силы вязкости, которые, поскольку изменение происходит очень медленно, чрезвычайно малы.

Но пусть большой кусок этого напитка толщиной в три-четыре дюйма поместят в стеклянную банку диаметром в десять-двенадцать дюймов, уже частично заполненную водой, и поместят под нее несколько обычных пробок, а на верхнюю поверхность положат несколько свинцовых пуль. Через месяц или два будет обнаружено, что пробки исчезли из воды в воск и что отверстия, которые они проделали, входя в него, полностью затянулись; точно так же пули погрузились в плиту, не оставив после себя никаких следов. Еще через два-три месяца будет видно, что пробки прорываются наружу через верхнюю поверхность плиты, а пули будут найдены в воде внизу. Произошло то же самое, что произошло бы, если бы вместо смолы использовали воду, только на это ушло гораздо больше времени. Пробки всплывали сквозь воск из-за гидростатической силы, направленной вверх, создаваемой воском, действующим как жидкость; а пули опускались вниз из-за превышения их веса над гидростатической силой, действующей на них, как на пробки, направленной вверх. Движению в обоих случаях противодействовали силы вязкости, задействованные в игре.

Применение этого к светоносному эфиру происходит незамедлительно. Пусть эфир рассматривается как субстанция, которая может совершать колебания только "когда время и силы подходят", то есть когда силы, производящие искажение, действуют лишь бесконечно малое время (как при запуске камертона легким ударом) и не слишком велики. Колебания могут создаваться локально, и среда может обладать истинной жесткостью, благодаря которой они распространяются в более удаленные части; то есть волны распространяются из центра возмущения. С другой стороны, если силы действуют долго, даже если они малы, они вызывают постоянно увеличивающееся изменение формы. Таким образом, планеты движутся, по-видимому, без сопротивления.

Отсюда следует вывод, что кажущиеся противоречивыми свойства эфира не более загадочны, чем свойства смолы или сапожного воска. И, в конце концов, материя по-прежнему остается глубокой загадкой.

Динамические иллюстрации, которые узнают студенты из старого Глазго, постоянно появляются на лекциях. Они будут вспоминать, почти с любовью, систему из трех *частиц* (весом 7 или 14

фунтов!). соединенные друг с другом в вертикальный ряд прочными спиральными стальными пружинами, которые всегда считались безмассовыми, и вспомним эксперименты лорда Кельвина с ними, демонстрировавшие три режима вибрации системы из трех масс, каждая из которых влияла на те, что находились рядом с ней с двух сторон. Здесь они обнаружат, что проблема решена для любого количества частиц и промежуточных пружин, и решение применимо к удлинению массивной молекулы, которую фон Гельмгольц внедрил в упругий эфир и использовал для объяснения аномальной дисперсии. Предлагается очень сложная молекула, состоящая из внешней оболочки, встроенной в эфир, как в более простом случае, второй оболочки внутри, соединенной с внешней достаточным количеством равных радиальных пружин, третьей внутри и аналогично соединенной со второй радиальными пружинами, и так далее. Эта молекула будет иметь столько мод вибрации, сколько существует наборов пружин, и поэтому может, если ее привести в движение, создавать сложные возмущения в эфире, в который она погружена.

Модификация этого устройства, с помощью которой лорд Кельвин объяснил фосфоресценцию таких веществ, как светящаяся краска, также описана, и некоторые узнают ее как старого друга. Около двух дюжин прямых деревянных стержней длиной восемнадцать дюймов прикреплены к стальной проволоке на расстоянии четырех-пяти дюймов друг от друга, как ступеньки на лестнице, сделанной из одной веревки по центру ступеней. Проволока прикреплена к каждому стержню таким образом, что стержень должен вращаться вместе с проволокой, если последняя скручена по кругу. Каждый стержень снабжен кусочком свинца на каждом конце, чтобы придать ему больший момент инерции относительно проволоки. Проволока с прикрепленной к ней "лестницей" жестко прикреплена к центру поперечной балки наверху, которая может поворачиваться вокруг проволоки как вокруг оси и, таким образом, передавать проволоке скручивающие колебания с периодом, зависящим от данного привода. Скользящие грузы, прикрепленные к штанге, позволяют изменять момент ее инерции по своему усмотрению. На нижнем конце проволоки закреплена поперечина с двумя лопастями, погруженная в патоку в емкости внизу. Когда период действия возбудителя был очень большим, волны кручения не распространялись вниз по "лестнице", но когда период становился достаточно коротким, волны распространялись вниз и поглощались патокой внизу. В первом случае вибрации сохранялись; случай был аналогичен случаю фосфоресценции.

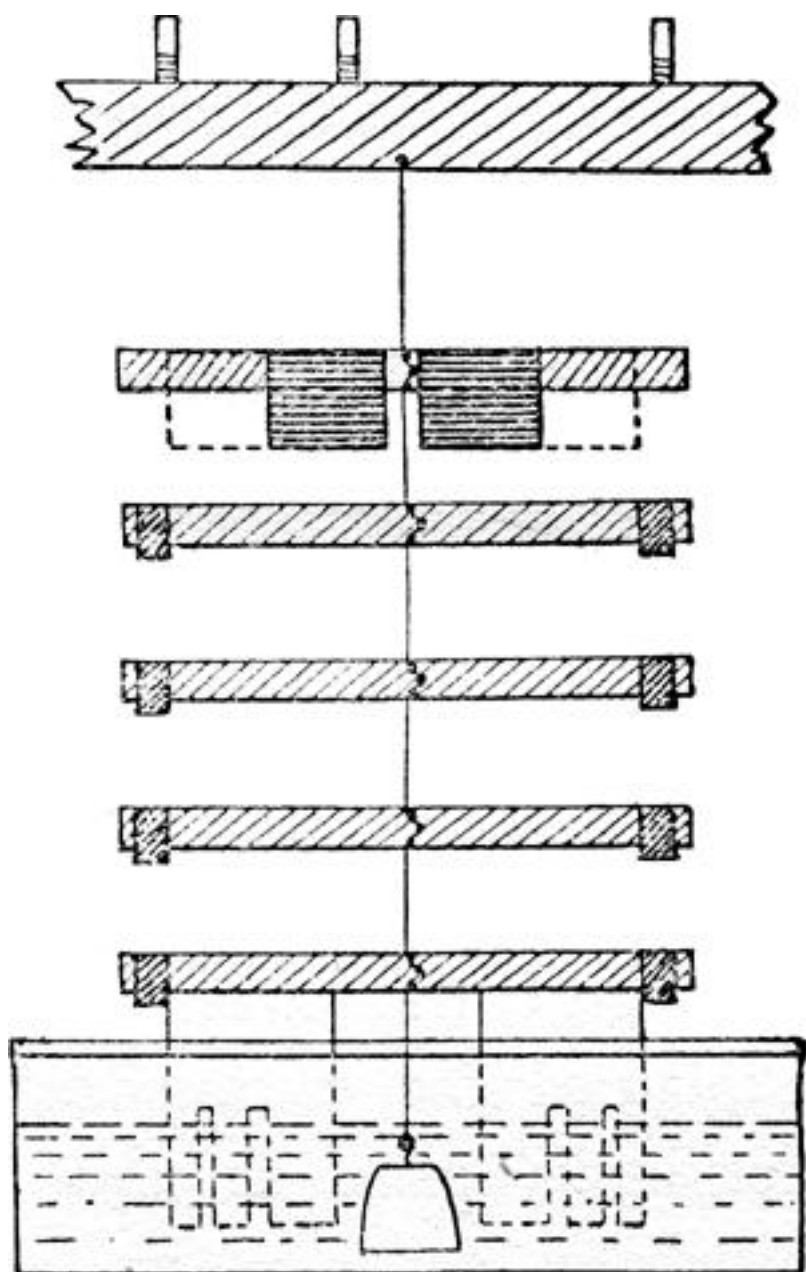


Рис. 18.

Между прочим, в этих лекциях дается полное и очень привлекательное изложение теории упругого твердого тела, сопровождаемое характерными отступлениями по вопросам, представляющим интерес, которые напрашиваются сами собой, и по темам, по которым лектор придерживался твердого мнения, таким, например, как абсурдная британская система мер и весов. Книга во многих местах читается как отчет о некоторых лекциях по высшей математике, которые читались на каждом занятии в Глазго; и по этой причине, если ни по какой другой, она будет прочитана старыми студентами высшего класса с искренним интересом. Но обсуждение огромной фундаментальной трудности, связанной с рассеянием, — того факта, что свет разной длины волны имеет разную скорость в обычной прозрачной материи, — обсуждение различных теорий рассеяния, которые были выдвинуты, конструкции молекул, гиростатических и негиростатических, со всеми их замечательными свойствами, которые лорд Кельвин изобрел

для того, чтобы создать динамический механизм, который будет имитировать действие материи, проявляющееся в сложных проявлениях оптических явлений, не только изотропной материи, но и кристаллов, - когда-либо послужат уроком для каждого математика, который изучает физику. имеет мужество напасть на эту тему и остаться памятником экстраординарному гению их автора.

В этих лекциях затрагивается тема, которая не рассматривалась в настоящем обзоре работ лорда Кельвина. На основании четырех аргументов — теплоты соединения меди и цинка вместе с разностью электрических потенциалов, возникающих при соприкосновении этих металлов, толщины капиллярной пленки мыла и воды (измеренной Рюккером и Рейнольдсом) непосредственно перед ее разрушением и работы, затраченной на ее растягивание, кинетической теории газов и расчетной длины свободного пробега частицы (приведенной также Лошмидтом и Джонстоном Стоуни), а также волновой теории света — лорд Кельвин оценил высшие и низшие пределы "размера частиц". атомы" тел, или, правильнее говоря, молекулярной структуры вещества. Мы не можем обсуждать эти аргументы — и с ними может ознакомиться на досуге любой, кто захочет обратиться к Тому I ("Строение материи") *популярных лекций и обращений лорда Кельвина*, к его лекции в Королевском институте по этому вопросу, которая приводится там полностью, — но мы можем сформулировать его вывод. Пусть капля воды, например, дождевая капля, будет увеличена до размеров земли, то есть от сферы диаметром четверть дюйма или меньше до сферы диаметром 8000 миль, и пусть размеры молекулярной структуры будут увеличены в той же пропорции. "Увеличенная структура была бы более крупнозернистой, чем куча мелкой дроби, но, вероятно, менее крупнозернистой, чем куча крикетных мячей".

Конечно, здесь не ставится цель передать идею о том, что молекулы представляют собой сферы, подобные дробовым или крикетным мячам; они, несомненно, имеют собственную структуру. И никаких заявлений не делается относительно делимости или неразделимости молекул. Утверждается лишь, что если разделение довести до мельчайших размеров, близких к размерам конструкции, или превышающих их, то будут получены порции вещества, которые не обладают физическими свойствами вещества в массе.

Недавние интересные исследования химиков и физиков явлений, которые, по-видимому, демонстрируют распад не только молекул, но даже атомной структуры вещества, привлекли внимание лорда Кельвина в последние годы его жизни, и *еще больше* он пытался сформулировать динамические объяснения электронного (или, как он предпочитал называть это, "электронического") действия. Но, несмотря на живой интерес ко всем видам исследований, он снова и снова обращался к старым теориям света и своим динамическим представлениям об эфире и кристаллах с новой силой и энтузиазмом.

ГЛАВА XV

СКОРОСТЬ ТЕЛЕГРАФНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ—ПРОКЛАДКА ПОДВОДНЫХ КАБЕЛЕЙ— ТЕЛЕГРАФНЫЕ ПРИБОРЫ—НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ, КОМПАС И ЗОНДИРУЮЩАЯ МАШИНА

Теория сигнализации

Когда в середине девятнадцатого века начал обсуждаться вопрос о прокладке атлантического кабеля, профессор Томсон приступил к обсуждению теории передачи сигналов по такому кабелю. Телеграфисты-практики обычно не понимали, что условия работы будут сильно отличаться от тех, к которым они привыкли на наземных линиях, и что приборы, используемые на таких линиях, будут бесполезны для прокладки кабеля. Такой кабель состоит из медного проводника, отделенного от морской воды покрытием из гуттаперчи; он образует удлиненную лейденскую банку очень большой емкости, которая, когда к одному концу проводящего сердечника подсоединяется аккумулятор, постепенно заряжается, сначала на этом конце, а затем все на большем расстоянии от него, и затем снова постепенно разряжается, когда аккумулятор извлекают и конец проводника подсоединяют к земле. Здесь, опять же, применение анализа Фурье решило проблему, которая, с некоторыми модификациями и в предположении, что работа происходит медленно, по существу является той же проблемой, что и диффузия тепла вдоль проводящего стержня или диффузия раствора соли вдоль столба воды. Сигналы задерживаются (и это был один из результатов исследования) таким образом, "что время, необходимое для достижения заданной доли максимальной силы тока на удаленном конце", когда заданная разность потенциалов прикладывается на другом, или домашнем конце, пропорционально произведению емкости и сопротивления кабеля, каждое из которых берется на единицу длины, а также пропорционально квадрату длины кабеля. Другими словами, замедление пропорционально произведению сопротивления медного проводника на общую пропускную способность кабеля. Это дало практическое правило, имеющее большое значение для руководства при производстве подводных кабелей. Проводник должен обладать максимально возможной проводимостью и, следовательно, должен быть изготовлен из чистой меди; изолирующее покрытие должно, образуя почти абсолютно непроводящую оболочку, иметь как можно более низкую удельную индуктивную способность. Первое из этих условий противоречило некоторым выдвинутым взглядам о том, что необходимо было только, чтобы внутренний проводник имел высокую электропроводность на своей поверхности; и последовали некоторые споры по этому вопросу. Закон обратных квадратов, как его называли, был подвергнут резкому сомнению из-за ошибочной интерпретации некоторых экспериментов, которые были проведены для его проверки. Ибо, если потенциал на исходном конце регулярно изменять в соответствии с простым гармоническим законом, так что число периодов колебаний в секунду составляет n , изменения потенциала распространяются со скоростью $2\sqrt{(\pi n/cr)}$, где c и r - пропускная способность и сопротивление кабеля, каждое из которых берется на единицу длины. В этом случае для длинного кабеля существует скорость распространения, не зависящая от длины; и этот факт, по-видимому, ввел экспериментаторов в заблуждение. Точка зрения Томсона возобладала, и результатом стало создание, сначала компанией Thomas Bolton & Sons, в Сток-он-Тренте, заводов по производству меди с высокой проводимостью, что в настоящее время является крупной отраслью промышленности.

Математического метода Фурье, описывающего теплопроводность вдоль стержня, достаточно для решения проблемы, при условии, что передача сигналов происходит настолько медленно,

что не приводит к возникновению электромагнитной индукции в какой-либо серьезной степени. Для быстрой сигнализации, при которой речь идет об очень быстрых изменениях тока, электродвижущие силы, обусловленные ростом или ослаблением тока, были бы серьезными, теория диффузии была бы неприменима. Но обычная работа кабеля происходит достаточно медленно, чтобы такими электродвижущими силами можно было пренебречь.

Прокладка первых американских кабелей

Первый кабель в 1858 году был проложен американским фрегатом *Niagara* и его превосходительством *Agamemnon* после изготовления со всеми предосторожностями, рекомендованными исследованиями профессора Томсона. Трудно представить, насколько трудным было такое предприятие в то время. При изготовлении огромного кабеля, укладке его в кабельные резервуары на борту судов, изобретении механизмов для укладки, контроля и подбора пришлось столкнуться с небольшим опытом, которым могли бы руководствоваться инженеры. И здесь Томсон, благодаря своему знанию динамики и истинному инженерному чутью, снова оказал большую помощь. В 1865 году он прочитал очень ценную статью о силах, действующих при прокладке и подъеме глубоководных кабелей, показывающую, как можно свести к минимуму напряжения в различных важных практических случаях - например, при подъеме кабеля для ремонта.

Первый атлантический кабель был частично проложен в 1857 году у *Ниагары*, когда он оборвался на глубине 2000 морских саженей примерно в 330 милях от Валентии, где началась прокладка. Была проделана дополнительная протяженность в 900 миль, и предприятие было возобновлено. На этот раз было решено, что два судна, каждое с половиной троса на борту, должны встретиться и соединить трос посреди океана, а затем отправиться в противоположных направлениях: "*Агамемнон*" - к Валентии, "*Ниагара*" - к Ньюфаундленду. Профессор Томсон был инженером, отвечавшим за электрические испытания на борту "*Агамемнона*". После различных неудач кабель был наконец благополучно проложен 6 августа 1858 года, и вскоре после этого Великобритания и Соединенные Штаты обменялись поздравлениями. 6 сентября было объявлено, что сигналы перестали проходить, и профессор Томсон и другие инженеры предприняли расследование причины остановки. В отчете говорилось, что кабель был изготовлен слишком поспешно, что на самом деле он был недостаточно хорош и что напряжения при его прокладке были слишком велики и неравномерны. Отремонтировать его оказалось невозможным, так что не было другого выбора, кроме как отказаться от него.

Этот кабель, вероятно, серьезно пострадал от насильственных средств, которые, по-видимому, использовались для передачи сигналов по нему. Теперь к кабелю на передающем конце прикладывается только очень умеренная разница потенциалов, а скорость передачи сигналов достигается за счет использования приборов, движущиеся части которых обладают малой инерцией и легко реагируют только на чрезвычайно слабый ток.

Второй трос был изготовлен и проложен в 1865 году компанией Great Eastern, которая могла брать на борт все судно сразу и плыть от берега к берегу. Он также был хорошо приспособлен для работы с кабелем благодаря наличию как винта, так и лопастей. Как указывает Томсон, "путь рулевого управления" на судне можно было получить, двигая винт вперед, чтобы направить струю воды за корму к рулю, в то время как весла были отведены за корму, чтобы предотвратить движение судна вперед. Это было большим преимуществом при маневрировании во многих случаях.

Этот трос также оборвался, но третий был успешно проложен в 1866 году тем же судном, а второй был восстановлен и отремонтирован, так что два хороших троса были закреплены для коммерческой эксплуатации. В обеих экспедициях профессор Томсон выступал в качестве инженера-электрика и по возвращении домой был удостоен рыцарского звания и благодарности Англо-американской телеграфной компании, а также свободы города Глазго.

Впоследствии он работал инженером французского Атлантического кабеля, бразильской компании и компании River Plate, а также Коммерческой компании, чьи два новых атлантических кабеля были проложены в 1882-4 годах.

Зеркальный Гальванометр и Сифонный регистратор

Поскольку каким бы ни был потенциал, приложенный к передающему концу кабеля (и, конечно, как уже говорилось, этот потенциал должен был поддерживаться на как можно более низком значении), ток на принимающем конце увеличивался постепенно, было необходимо иметь как можно более тонкий приемный прибор, чтобы он быстро реагировал на растущий и все еще слабый ток. Ибо если бы кабель не работал со скоростью, которая позволяла бы взимать плату за переданное слово, находящееся в пределах досягаемости коммерческих работников, было очевидно, что предприятие не достигло бы своей цели. А поскольку кабель не мог стоить меньше полумиллиона фунтов стерлингов, доход, на который следовало ориентироваться, был очень значительным. Эту проблему Томсон также решил, изобретя свой зеркальный гальванометр. Подвешенный магнит был сделан из маленьких кусочков часовой пружины, приклеенных к маленькому зеркалу, так что вся движущаяся часть весила всего одну-две гранулы. Таким образом, его инерция, или сопротивление приведению в движение, было очень небольшим, и он подвешивался на одном шелковом волокне внутри закрытой камеры в центре катушки гальванометра. Луч света от лампы отражался на белой бумажной шкале перед зеркалом, которая при повороте заставляла пятно света перемещаться по бумаге. Движение этого длинного безмассового указателя влево рассматривалось как точка, движение вправо - как тире, и поэтому можно было использовать азбуку Морзе. Этот инструмент использовался в кабельной экспедиции 1858 года, и Томсон изобрел для него специальную форму подвески, позволяющую использовать его на борту судна. Подвесная нить, вместо того чтобы удерживаться только на одном конце, была натянута сверху донизу камеры, в которой висела игла, и плотно удерживалась за счет закрепления на обоих концах. Таким образом, крен или качка корабля причиняли зеркалу минимальные помехи.

Гальванометр также был заключен в толстый железный футляр, чтобы защитить его от магнитного поля, создаваемого железом корабля. "Гальванометр в железной оболочке", впервые использованный в подводной телеграфии (в экспедиции 1858 года на американском фрегате *Niagara*), находится в коллекции исторических приборов на факультете естественной философии Университета Глазго.

Изобретенный тогда зеркальный гальванометр стал одним из самых полезных инструментов лаборатории. Зеркальное отражение в настоящее время используется также для индикаторов многих видов инструментов.

Позже гальванометр был заменен другим изобретением профессора Томсона — сифонным регистратором. Здесь маленькая и изящная ручка была сделана из куса очень тонкой стеклянной трубки (фактически трубки для вакцинации) в форме сифона, короткий конец

которой окунался во флакон с чернилами, в то время как другой конец делал небольшие зигзагообразные надрезы на бумажной ленте, протянутой через нее с помощью механизма. Сифон перемещался взад и вперед сигнальными токами, которые протекали в маленькой катушке, подвешенной между полюсами электромагнита, возбуждаемого местной батареей, и чернила чередой мелких капель стекали с ручки на бумагу. Это было достигнуто путем электрификации чернильницы и чернил с помощью местной электрической машины и поддержания контакта бумаги с неизолированным металлическим роликом. Электрическое притяжение между наэлектризованными чернилами и неэлектрифицированной бумагой, таким образом, вытягивало чернильные капли наружу, и перо, которое никогда не касалось бумаги, совершенно не подвергалось трению. У обоих этих приборов было тонеоценимое преимущество, что движение светового пятна или пера взад-вперед происходило независимо от обычных токов заземления по кабелю.

Расположение магнита и подвешенной катушки в этом приборе стало широко известно как "гальванометр д'Арсонваля". Это применение было предвосхищено Томсоном и отчетливо упомянуто в его патенте на регистратор задолго до того, как такие гальванометры когда-либо использовались. Позже это было предложено несколькими экспериментаторами до М. д'Арсонваля.

Не будет преувеличением сказать, что своими рассуждениями о скорости передачи сигналов, своими заслугами инженера-электрика и особенно изобретением приборов, способных реагировать на очень слабые токи, Томсон сделал подводную телеграфную связь коммерчески возможной. Позже он вступил в партнерство с мистером К. Ф. Варли и профессором Флимингом Дженкином. Фирма сделала комбинацию изобретений: Варли запатентовал метод сигнализации с помощью конденсаторов, а Дженкин позже предложил и запатентовал автоматический ключ для "передачи обрыва" по кабелю, то есть подачи сигнала путем помещения одного полюса батареи на расстояние, немного меньшее обычного, в линию, а затем переворачивания батареи на оставшийся период. Это давало более четкие сигналы, поскольку реверсирование помогло разрядить кабель быстрее, чем это было бы при простом подключении к земле между двумя сигналами. Фирма Thomson, Varley & Jenkin принимала видное участие в кабельных работах; и Томсон и Дженкин выступали в качестве инженеров на многих крупных предприятиях. Они наняли штат молодых электриков на кабельных заводах в Миллуолле и в других местах, которые следили за кабелем во время производства, и отправили их в море в качестве представителей и помощников для выполнения аналогичных обязанностей в процессе прокладки кабеля. В их штате было много мужчин, которые в дальнейшей жизни достигли высот в области электротехники и инженерного дела.

Компас и зондирующая машина для моряков

После предыдущих атлантических экспедиций сэр Уильям Томсон обратил свое внимание на конструкцию навигационных приборов и изобрел морской компас и устройство для зондирования проводов, которые сейчас так хорошо известны. Он пришел к выводу, что используемые компасы имели слишком большие иглы (некоторые из них представляли собой стержневые магниты длиной семь или восемь дюймов!), чтобы быстро и точно реагировать на изменения курса и, что было еще более серьезно, допускать применение корректирующих магнитов и масс мягкого железа, нейтрализующих действие магнетизма корабля.

Карта компаса состоит из бумажного кольца, на котором обычным способом выгравированы "точки" и градусы, и удерживается по кругу легким кольцом из алюминия. Шелковые нити тянутся радиально от обода к центральному выступу из алюминия, в котором находится колпачок из алюминия. В верхней части колпачка находится сапфировая опора, которая опирается на иридиевый наконечник, выступающий вверх из чаши компаса. Восемь магнитов из твердой, как стекло, стали длиной от 3 до 2 дюймов и толщиной примерно с вязальную спицу, которые образуют стрелку компаса, нанизаны, как ступени веревочной лестницы, на две шелковые нити, прикрепленные к четырем радиальным нитям.

Вес открытки чрезвычайно мал — всего $170\frac{1}{2}$ зерен; это меньше, чем $\frac{2}{5}$ унции. Но материя не просто уменьшена в количестве; она распределена в целом на большом расстоянии от оси; следовательно, период свободной вибрации велик, и карта очень устойчива. Большая легкость карты также приводит к тому, что ошибка из-за трения о точку опоры очень мала.

Ошибки компаса на железном корабле - это, в основном, полукруглая ошибка и квадрантная ошибка. Мы можем лишь кратко указать, как они возникают и как их исправляют. Магнетизм корабля можно рассматривать как частично постоянный, а частично индуктивный. Первый изменяется очень медленно, второй изменяется по мере изменения курса и положения корабля. Корабль представляет собой комбинацию продольных, поперечных и вертикальных балок. В целом это отличная железная или стальная балка, но ее конструкция придает ей продольную, поперечную и вертикальную намагниченность. Это нарушает работу компаса, на который также влияет намагничивание железных или стальных мачт и рангоутов, а также железа или стали, перевозимых в качестве груза.

Ошибка полукруглой формы в значительной степени обусловлена постоянным магнетизмом, но также частично и индуцированным магнетизмом. Он называется так потому, что, когда нос судна поворачивается на 360° , ошибка достигает максимума на двух курсах, расположенных на расстоянии 180° друг от друга. Она может составлять более 20° в обычном железном сосуде и до 30° или 40° в бронированном. Это исправляется двумя наборами стальных магнитов, размещенных своими центрами под иглой в нактоузе. Один набор имеет длину в носовой и кормовой частях, другой - в направлении против хода судна. Эти магниты устраняют погрешность на северном и южном, а также на восточном и западном курсах из-за двух горизонтальных составляющих магнитной силы, создаваемых главным образом постоянным магнетизмом судна. Для регулировки используется обычная процедура раскачивания судна при наличии отметок на берегу (истинные координаты которых известны с судна).

Квадрантная ошибка называется так потому, что ее максимумы находятся на четырех компасных курсах, расположенных последовательно на расстоянии квадранта, или 90° , друг от друга. Как правило, оно составляет максимум от 5° до 10° . Это происходит из-за индуцированного магнетизма и корректируется парой сфер из мягкого железа, размещенных с двух сторон компаса так, чтобы их центры располагались на линии, поперечной кораблю, проходящей через центр стрелки компаса. Однако бывают исключительные случаи, когда они располагаются в носовой и кормовой линиях, один перед иглой, другой сзади нее. Когда квадратичная ошибка однажды аннулирована, она всегда равна нулю, поскольку по мере изменения индуцированного магнетизма изменяется и магнетизм сфер, и корректировка остается хорошей. На новом корабле постоянный магнетизм медленно изменяется, и поэтому полукруглую коррекцию приходится время от времени улучшать, меняя магниты.

Эти корректировки - не совсем все, что необходимо произвести; но было указано достаточно, чтобы показать, как процесс компенсации может осуществляться с помощью Thomson compass. Слишком большие магниты, использовавшиеся ранее в качестве стрелок компаса, по-видимому, из-за ошибочного представления о том, что с их помощью можно получить более направленную силу, сделали квадратичную регулировку невозможной. Вращающаяся карта перемещала большие иглы в разные положения относительно железных шариков, когда они использовались, и оказывала на них индуктивное воздействие, которое реагировало на иглы, создавая, возможно, больше ошибок, чем было исправлено.

Томсон изобрел также прибор под названием "дефлектор", с помощью которого можно настраивать компас, когда невозможно увидеть солнце или звезды или пеленговать земные объекты. С его помощью можно сравнить направляющие усилия на иглах по разным направлениям. Затем производится регулировка путем размещения корректоров таким образом, чтобы направляющая сила была максимально одинаковой на всех курсах. После этого компас становится совершенно правильным.

Правильно будет сказать, что теория отклонений компаса сначала частично обсуждалась Пуассоном, но впоследствии очень полно и элегантно была изложена покойным мистером Арчибалдом Смитом из Джорданхилла, чьи мемуары, ныне включенные в *Руководство Адмиралтейства по отклонениям компаса*, привели к изобретениям лорда Кельвина.

Компас Лорда Кельвина в настоящее время почти повсеместно используется в торговой службе этой страны и в большинстве военно-морских сил мира. Это значительно повысило уверенность и безопасность судоходства.

Звуковая машина также хорошо известна. Сначала фортепианная проволока использовалась для глубоководного звучания коммодором ВМС США Белкнапом и другими по рекомендации сэра Уильяма Томсона. Наконец, была создана машина, с помощью которой грузило можно было опускать на дно моря и поднимать снова в течение нескольких минут; так что можно было произвести зондирование без длительной задержки, связанной со старым методом, с помощью мотка пеньковой веревки, который часто побуждал судоводителей рисковать и выходить на берег, вместо того чтобы останавливать судно для этой цели. Проволока оказывала небольшое сопротивление движению в воде, и с помощью соответствующей намоточной машины с тормозом, предотвращающим слишком быстрое натягивание проволоки и ее перегиб, когда она почти наверняка порвалась, один человек мог быстро протрубить и снова поднять ее, в то время как другой занимался проволокой и грузилом. Измерительный прибор, состоящий из длинной перьевой трубки, закрытой на верхнем конце и покрытой изнутри хромом серебра, по воздействию морской воды на покрытие показывал, насколько глубоко вода прошла по трубке, сжимая воздух над ней; и по этому показанию, если поместить трубку вдоль деревянной линейки с надлежащей градуировкой, глубина считывалась сразу. Благодаря усовершенствованному оборудованию судно, приближающееся к берегу в ненастную погоду, могло проводить зондирование с короткими интервалами без остановки и сразу обнаруживать любое начало обмеления воды и таким образом избегать опасности.

Однопроволочный провод в настоящее время не используется, поскольку тонкий многожильный провод считается более безопасным и не менее эффективным. Калибр также был улучшен. Это устройство можно увидеть на любом хорошо известном морском судне; хотя до сих пор существуют или были до недавнего времени паровые суда без этого устройства, хотя

и пересекавшие Ла-Манш с пассажирами. Они зависели от устаревшей пеньковой веревки, намотанной на железное веретено, которое члены судовой команды держали вертикально на палубе, в то время как шнур разматывался при опускании грузила.²⁴

Электрические и другие изобретения сэра Уильяма Томсона слишком многочисленны, чтобы описывать их здесь, и они постоянно используются везде, где требуется точность измерений. Давным-давно он изобрел электрометры для абсолютных измерений электрического потенциала ("электрического давления"); совсем недавно его токовые весы придали такую же точность электродинамическому измерению токов. Все его ранние инструменты были изготовлены мистером Джеймсом Уайтом из Глазго. Бизнес, основанный мистером Уайтом и впоследствии продолженный на Кембридж-стрит, получил огромное развитие и в настоящее время принадлежит обществу с ограниченной ответственностью - господам Уайту. Кельвин и Джеймс Уайт (Ограниченное количество).

В течение многих лет сэр Уильям Томсон был заядлым яхтсменом, и его яхта-шхуна "*Лалла Рукх*" была хорошо известна на Клайде и в Соленте. Опытный штурман, он с удовольствием совершал глубоководные путешествия на своей яхте и не раз доходил до Мадейры. В этих экспедициях было разработано множество навигационных и гидродинамических задач. Однако на долгие годы он отказался от мореплавания во время отдыха и жил в Глазго, Лондоне и в Ларгсе, графство Эйршир, где в 1875 году построил большой и комфортабельный дом с видом на залив Ферт и озера Аргайлшир, которые он так хорошо знал и любил.

Во время своих глубоководных экспедиций на яхте он был впечатлен полезностью метода Самнера для определения местоположения судна. Предположим, что в данный момент высота солнца определяется с борта корабля. Время по Гринвичу и, следовательно, долгота, при которой солнце находится вертикально, известна по хронометру, а склонение солнца известно из Морского альманаха. Точка на земле, расположенная вертикально под солнцем, может быть отмечена на карте, и вокруг нее может быть нарисован круг (или, скорее, то, что было бы кругом на земном шаре), из каждой точки которого солнце имело бы наблюдаемую высоту. Корабль находится в точке на этом круге. Через некоторое время снова наблюдается высота солнца и рисуется новый "круг". Если первый "круг" полностью сдвинуть на карте вдоль расстояния, пройденного в интервале, он пересечет второй в двух точках, одной из которых будет местоположение корабля, и, как правило, можно определить, в какой именно, без опасности ошибки.

Сэр Уильям Томсон напечатал таблицы для облегчения расчетов по методу Самнера и постоянно использовал их в своих собственных путешествиях. Он был хорошо сведущ в морском деле всех видов и обычно использовал свой опыт, чтобы пролить свет на сложные проблемы динамики. Некоторые из них можно найти в "Томсоне и Тейте"; например, в части I, § 325, где ряд морских явлений приводится в качестве иллюстрации важного принципа гидродинамики. Пятый приведенный пример выглядит следующим образом: "В спокойном море при умеренном ветре, дующем параллельно берегу, парусное судно, направляющееся к берегу, с недостаточно поставленными парусами, может спастись от выплзания на берег только тем, что поднимет больше парусов и быстро поплывет к берегу или к опасности, которой следует избегать, чтобы позволить ему увести судно от нее. Риск выхода на берег в соответствии с уравнениями Лагранжа является частым случаем "трогания в путь" при подъеме якоря или даже после соскальзывания со швартовов". Его морское мастерство было хорошо известно

капитанам кораблей, с которыми он много общался и чей интеллект и практические навыки он высоко ценил.

ГЛАВА XVI

ЛОРД КЕЛЬВИН В СВОЕМ КЛАССЕ И ЛАБОРАТОРИИ

Невозможно передать тем, кто никогда не учился в Глазго, какое-либо четкое представление о Томсоне, каким он представлялся студентам, с которыми он встречался ежедневно во время сессии. Его появление на собраниях Британской ассоциации и его оживленные расспросы различных авторов статей, его погруженность в свой предмет и забвение о том, как быстро летит время, когда он сам читает доклад, надолго запомнятся ученым: но хотя их достаточно, чтобы представить, каким он был в своей собственной аудитории, на картине отсутствует обстановка мебели, аппаратуры, ассистентов и студентов, которые все способствовали уникальному впечатлению, производимому его личностью на учеников. Лекция-стол—с длинными прямыми передней и заканчивается преломляется внутрь, в окружении более мелких круглых столов поддерживается на цилиндрических опорах—Ладена с документами; нарисованной схемы солнечного спектра и пути цветных лучей через призму, вешали на стены; длинный провод с цилиндрической вибратор крепится, для экспериментов на кручение, и тройной спирали весны вибратор, который висел на обоих концах длинной доске; маятник тридцать футов в длину, состоящий из стальной проволоки и двенадцать-фунт пушечного ядра, как Боб, подвешенный к верхушке купола-крыши над лекция-таблицы;большие железные колеса в красивый эркер окно справа от преподавателя, а коллекция оптических приборов на столе напротив центрального окна помещения, из которого небольшой стальной раме стекла—дорогие сердцу архитектор—были убраны; часы на любой стороне комнаты, одна без движения, другие указывающие время, и прикрепив к нему сигнал, который показал, когда "злой колокол" вне перестал пошлыны; десять скамеек энергичных и веселых студентов, которые заполнили зрительный зал; все это в совокупности образуют сцену, в которой каждый ученик вспоминает и которые не могут быть адекватно описано. Похожая сцена, с некоторыми отличиями в организации и вызывающая свои особые ассоциации, будет происходить с каждым студентом, который учился в Старом колледже.

Автор никогда не забудет лекционный зал, каким он впервые увидел его со своего места на скамье VIII через несколько дней после начала сессии 1874-5. Сэр Уильям Томсон, с активностью, скорее подчеркиваемой его хромотой, чем чем-либо иным, вошел вместе со студентами, обошел стол и, подняв бинокль, осмотрел расставленные приборы. Затем, когда ученики хлынули все увеличивающимся потоком, звонарь отпустил гирю будильника и она медленно опустилась примерно на четыре или пять футов с верха часов на платформу внизу. К тому времени, когда вес снизился, студенты уже были на своих местах, а затем, когда Томсон подошел к столу, все поднялись, и он прочитал третий Сбор из Утренней службы Англиканской церкви. Тогда был обычай, и он до сих пор почитается больше при соблюдении, чем при нарушении (что стало довольно распространенным явлением), начинать все первые и вторые занятия дня молитвой; и выбор молитв был оставлен на усмотрение профессоров. Затем

ассистент проводил переключку; каждое имя называлось в своей английской или шотландской (поскольку кланы всегда были хорошо представлены) форме, и возвращался ответ "адсум".

Затем профессор начинал свою лекцию, как правило, с экзамена одного из студентов, который вставал вместо него, когда называли его имя. Томсон, как видно из приведенной в главе VI цитаты из Бангорского обращения, любил устные экзамены и после того, как второй час начал сокращаться как обычный для посещения, обычно посвящал десять-пятнадцать минут задаванию вопросов и критике ответов. Имена учеников, которых нужно было допросить, выбирались случайным образом из классной книги или с помощью своего рода лотереи, проводившейся путем помещения маленькой карточки для каждого ученика в коробку на столе и вытягивания имени всякий раз, когда нужно было допросить члена класса. Интерес к рисунку каждый день был очень сильным, потому что существовала восхитительная неопределенность относительно того, какое направление исследования может быть принято. Иногда, в разгар критики ответа, профессору внезапно приходила в голову идея, и он развивал ее до тех пор, пока забытый экзаменуемый тихо не возвращался на свое место, чтобы его больше не беспокоили, по крайней мере, в течение этого дня! И какое великое облегчение, если испытание было успешно пройдено и карточка была помещена в это вместилище благословенных, отделение, предназначенное для тех, кто был вызван и должным образом прошел судебный процесс! Но там было третье отделение, предназначенное для карточек тех несчастных, которые не смогли удовлетворить требования судьи! Читатель, возможно, предвидел тот факт, что три отделения этой судьбоносной шкатулки были широко известны изучающим под названиями трех великих обиталищ духов, описанных в *Божественной комедии* Данте.

Как уже говорилось, устный экзамен, которым начинались лекции, вызвал большое волнение, к которому добавился элемент случайности, связанный с извлечением имен из "чистилища" коробки. Этого испытания боялись отсталые студенты, которых Томсон находил, по его словам, афазичными, когда их вызывали отвечать на экзамене, но которые, безусловно, были кем угодно, только не афазичными в более благоприятных обстоятельствах. Иногда они воздерживались от отклика на свои имена, скромно стремясь уединиться с толпой, и некоторое время уходило на то, чтобы выяснить, присутствует ли назначенный экзаменуемый. Когда, наконец, его обнаруживали, он обычно вставал с горячим призывом к своим товарищам по обе стороны помочь ему в его нужде.

Макфарлейн обычно рассказывал об инциденте, который иллюстрировал изобретательность, с которой иногда пытались уклониться от испытания, связанного с экзаменом *viva voce*. Однажды днем, когда он усердно готовил иллюстрации к лекции на следующий день, в классную комнату вошел студент и, вовлекая его в беседу о каком-то моменте динамики, относительно которого, по его словам, у него возникли затруднения, вертелся вокруг коробки, содержащей три отделения, широко известные как Чистилище, Рай и Ад! Всегда, когда Макферлейн выходил из комнаты, чтобы принести что-нибудь из соседнего шкафа с аппаратурой, он, вернувшись, обнаруживал, что его любознательный друг поспешно удаляется в непосредственной близости от ящика. Наконец студент откланялся, принося многочисленные извинения за то, что доставил столько хлопот. Как и подозревал Макфарлейн, билета с именем этого студента больше не было найдено! Он обычно заканчивал свою историю следующим образом: "Я просто сделал для него новый билет и положил его поверх других билетов, а на следующий день сэр Уильям позвонил ему в самый первый раз". Можно себе представить, каковы были его чувства, который наивно

считал себя в безопасности во время сеанса, а теперь обнаружил, что подвергается "издевательствам", которые, как он, вероятно, ожидал, будут повторяться бесконечно.

Темой первой лекции, которую посетил писатель, было простое гармоническое движение, и она была проиллюстрирована с помощью маятников, спиральных пружин с грузиками, длинного вертикального стального стержня, увенчанного шариком из слоновой кости и прикрепленного к тяжелому основанию, камертонов и т.д.

Движение определялось как движение частицы, движущейся по диаметру круга — "вспомогательной окружности", как назвал ее Томсон, — чтобы всегда успевать за перемещением в направлении вдоль этого диаметра, при этом частица движется по кругу с одинаковой скоростью. Затем были найдены скорость и ускорение, и было показано, что частица непрерывно ускоряется к центру пропорционально расстоянию частицы от этой точки. Было доказано, что постоянное отношение ускорения к перемещению равно квадрату угловой скорости во вспомогательной окружности, и из этого факта, а также конкретного значения ускорения, когда частица находилась на обоих концах своего диапазона движения, было выведено выражение для периода в терминах скорости и радиуса вспомогательной окружности. Затем была получена обычная простая формула маятника.

Такой подход к элементарному вопросу, столь сильно отличающийся от всего, что встречается в обычных учебниках, сразу привлек внимание и донес, по крайней мере до некоторых из присутствующих, идею простого гармонического движения, которая была непосредственно применима ко всем видам случаев, таким как движение воздуха в звуковой волне или среды, передающей волны света.

Предмет законов Кеплера рассматривался в первых лекциях каждого курса, и на выводах Ньютона настаивали как на содержащем философию всего вопроса, ведущем, как они и делали, к единственному принципу, из которого можно было вывести законы, и к третьему закону, скорректированному, когда масса планеты сравнима с массой солнца. Иногда Томсон читал замечательный отрывок из "*Логики*" Гегеля, в котором он ссылается на ньютоновскую теорию тяготения и говорит: "Планеты не притягиваются в ту или иную сторону, они движутся по своим орбитам подобно благословенным богам", и комментировал это. Однажды он заметил: "Ну, джентльмены, если такова его физика, то какой должна быть его метафизика?" И, конечно, то, что *философ* отрицает, как, казалось, делал Гегель, все достоинства философской установки, в которую Ньютон поместил эмпирические результаты Кеплера, является весьма примечательным явлением.

Бодрость и энтузиазм профессора в то время были очень велики. Анимация его лица, когда он посмотрел на гиростату спиннинг, стоя на лезвии ножа на стеклянную пластину перед ним, и наклонился так, что его центр тяжести находился по одну сторону от точки опоры; с каким удовольствием он показал, что, спеша из прецессионных движений гиростаты вызвало рост, и замедляя прецессионных движений гиростаты вызвал к осени, так что свобода "прецессировать" был секрет его не падает; непосредственное применение исследование гиростаты для объяснения прецессии равноденствий, и иллюстрации, модель земного шара, расположены так, что центр должен быть неподвижной точки, А вокруг своей оси—материал шипа латуни—круглый прокат горизонтальный круг, в центре которого представлен полюса эклиптики, и диаметр которого стягиваемый угол в центре земного шара дважды наклон эклиптики; удовольствие, с которым он указал на движение равноденствия точек вдоль

окружности вокруг земного шара на уровне ее центра, и представляющих плоскости эклиптики, и он, улыбаясь, - объявил он, когда ось прокатился один раз по кругу, что 26000 лет прошло—все эти радовали своих слушателей, и выступил с лекцией запоминающимся.

Затем гироскоп, установленный вертикальной осью на цапфах на одном уровне с маховиком и опирающийся на деревянную раму, которую повсюду носит профессор! Восторг студентов от остановки гироскопа, когда рама, гироскоп и все остальное, вращались в направлении вращения маховика, и его внезапного переворачивания вверх дном, когда раму поворачивали в другую сторону, был чрезвычайным, и когда он предположил, что гироскоп может быть спрятан на подносе с бокалами, который несет официант, их оценка того, что произойдет, была выражена смехом и бурными аплодисментами.

Некоторым хотелось бы немного внимательнее проследить за движениями вращающихся тел и ясно понять, почему они ведут себя именно так. Очевидно, Томсон воображал, что все это самоочевидно, поскольку он никогда не приводил ничего, кроме простой параллелограммной диаграммы, показывающей композицию с уже существующим угловым моментом вокруг оси верха, того, что генерируется вокруг другой оси за короткое время под действием силы тяжести.

Фактически, стабильность и нестабильность гироскопа на подносе дают наилучшую возможную иллюстрацию двух различных форм решения дифференциального уравнения, $\ddot{\theta} + \mu\theta = 0$, в зависимости от того, является ли μ положительным или отрицательным; хотя инверсию также можно очень просто объяснить, исходя из первых принципов. Все это, без сомнения, рассматривалось Томсоном как очевидное; но это было далеко не самоочевидно даже для хороших учеников обычного класса, которые, без исключения, начинали изучать динамику.

Поглощенность Томсона сиюминутной работой часто была очень велика, и в таких случаях ему очень не нравилось, когда какая-либо незначительная случайность или неудобство низводили его до уровня подлунных вещей. Каждому старому ученику придут на ум примеры того большого значения, с которым он приказывал принять меры предосторожности, чтобы подобное не повторилось. Экземпляры "*Натурфилософии*" Томсона и Тейта — "Т и Т" было ее знакомым названием - и других книг, включая таблицы Барлоу и другие сборники числовых данных, всегда хранились на лекционном столе. Но иногда студент-лаборант забредал в лабораторию после того, как все было подготовлено к утренней лекции, и уносил Барлоу, чтобы произвести какие-то вычисления, и, конечно, забывал вернуть его. На следующее утро от Барлоу в спешке потребовали бы какой-нибудь номер, а книга пропала бы. Тогда Томсон приказывал, чтобы Барлоу приковали к лекционному столу, и приказывал своему ассистенту проследить, чтобы это было сделано без промедления в течение часа!

Однажды, после выполнения части расчетов на длинной закрепленной на стене за столом доске, у него кончился мел, и он опустил руку к длинному выступу, выступавшему из нижней части доски, чтобы найти другую фигуру. Ничего этого не было просто так, и ему пришлось пройти шаг или два, чтобы получить хоть одно. Поэтому он приказал Макфарлейну, своему помощнику, который всегда был при исполнении служебных обязанностей, в будущем иметь на подоконнике достаточное количество предметов, чтобы он мог найти их под рукой, где бы они ему ни понадобились. Макфарлэйн забыл о судебном запрете или в то время не смог достать больше мела, и то же самое произошло на следующий день. Итак, была отдана команда: "Макфарлэйн, я сказал тебе взять побольше мела, а ты этого не сделал. Завтра положите на этот выступ сто кусочков мела; помните, сто кусочков; я их пересчитаю!" Макфарлэйн, боясь, что

его снова застигнут врасплох, послал в тот же день за несколькими коробками мела и аккуратно разложил новые блестящие белые палочки на полке, все аккуратно параллельно под углом к краю. Полка была около шестнадцати футов в длину, так что на каждые два дюйма приходилось по кусочку мела, и результат был очень хорошим. На следующее утро класс был в восторге и высоко оценил усердие Макферлейна. Вошел Томсон, поднял бинокль, посмотрел на дисплей, мило улыбнулся и, повернувшись к аплодирующим студентам, начал свою лекцию.

Время от времени проводились специальные эксперименты, которые необычайно возбуждали интерес класса. Одним из них было определение скорости пули, выпущенной из винтовки в баллистический маятник Робинса. Маятник, состоящий из массивного свинцового стержня, прикрепленного к жесткой раме из железных прутьев, оборачивающихся вокруг лезвий ножей, был установлен за лекционным столом, и Томсон выпустил пулю из винтовки Джейкоба в стержень маятника. Скорость определялась по отклонению маятника, его известному моменту инерции относительно линии острия ножа, расстоянию линии огня от этой линии и массе пули.

В некоторых заметках о лорде Кельвине, появившихся в газетах, воображение авторов превратило винтовку Джейкоба в ту, которую профессор Томсон носил в первые годы волонтерского движения в качестве члена отряда Глазго. Он до сих пор используется на факультете естественной философии для того же эксперимента и представляет собой дульнозарядное ружье большого калибра, которое выпускает пулю весом в унцию. Он был изобретен известным индийским спортсменом полковником Джейкобом для охоты на крупную дичь в Индии. Томсон занимал должность капитана в К (или Университетской) роте стрелковых добровольцев и поэтому не брал винтовку в руки, за исключением тех случаев, когда он, возможно, упражнялся в стрельбе по мишеням.

Студенты с первых скамей всегда находились в состоянии возбуждения, к которому в некоторых случаях, возможно, примешивался небольшой трепет. Потому что цель была совсем рядом с ними, и хотя опасность была предотвращена установкой большого деревянного экрана перед бобом, чтобы не разлетелись осколки пули в случае, если она промахнется мимо цели и ударится о железный корпус боба, присутствовала некоторая нервозность по поводу того, что могло произойти. Винтовка, заряженная Макферлейном, который взвесил заряд пороха (столько-то драхм) по рецепту, хранящемуся в полости приклада, была положена на стол, и две подставки, снабженные V-образными выемками для установки винтовки, были установлены в надлежащее положение, позволяющее попасть в яблочко. Томсон обычно доставал небольшую коробочку ваты и вставлял по чуть-чуть в каждое свое ухо, чтобы не травмировать барабанную перепонку из-за репортажа, и советовал зрителям сделать то же самое. Затем, поправив бинокль, он наклонился, установил винтовку в нужное положение и выстрелил, и торжественная тишина, с которой наблюдали за прицеливанием и корректировкой, сменилась громкими аплодисментами. Длина ленты, натянутой под действием легкой пружины, была зачитана Макферлейном, который уже вывел на доске формулу для расчета скорости с коэффициентом, на который нужно было умножить длину ленты, чтобы получить скорость в футах в секунду. Затем, с намеком на то, что в последующей экзаменационной работе в понедельник утром по этому предмету будет задан вопрос, связанный с численными расчетами, лекция обычно заканчивалась или завершалась некоторыми дальнейшими замечаниями об угловом (или, как всегда предпочитал называть это Томсон, моменте) импульсе.

Много лет спустя, в ходе дебатов в Палате лордов по предложению сделать обязательным использование метрической системы мер и весов, лорд Кельвин рассказал их светлостям, как он взвесил порох для зарядки этого ружья и, перепутав вес, зарядил ружье таким количеством пороха, которое почти наверняка разорвало бы ствол, но, к счастью, сделал паузу, прежде чем выстрелить.

Он часто прерывал ход лекции осуждением британской "не-системы мер и весов" - "безумный", "истощающий мозги", "опасный" были одними из самых мягких эпитетов, которые он применял к ней, и он глубоко сочувствовал студенту, чьи воспоминания о весе авоирдупа, тройском весе, аптекарском весе и т.д. Были несколько туманными. Опасность системы заключалась главным образом в том факте, что драхма аптекарей составляет 60 гран, в то время как драхма авоирдупа составляет $27\frac{1}{3}$ грана. Таким образом, такое количество драмов пороха, необходимое для зарядки ружья, является гораздо большим количеством, если считать в аптекарских драмах, чем если считать в авоирдупа. Как правило, он оставлял зарядание винтовки, как и все другие эксперименты в лекционном зале, своим ассистентам.

Другим экспериментом, вызвавшим большую сенсацию, был эксперимент, известный как "капля росы"! Воронка из латуни, состоящая из трубки длиной около 30 дюймов и шириной в дюйм и конического горлышка шириной около десяти дюймов, была снабжена куском прочного листового каучука, натянутого настолько туго, насколько это возможно вручную, поперек горлышка и водонепроницаемого с помощью порции бечевки и цемента по краю. Проволока, припаянная к внешней стороне бортика, хорошо удерживала эту порцию и делала все совершенно надежно. На плоской поверхности листа чернилами были нарисованы геометрические фигуры, чтобы впоследствии можно было изучить их искажение. Затем воронку подвешивали за прочную опору в перевернутом положении за столом, и в нее осторожно наливалась вода из резиновой подводящей трубки, соединенной с водопроводом. По мере того как воде давали накапливаться — сначала очень медленно, — лист резины постепенно растягивался и выпячивался, сначала до формы плоской линзы, а постепенно все больше и больше, пока не образовалась огромная водяная капля, 15 или 18 дюймов в горизонтальном диаметре и еще больших вертикальных размеров. Резиновая пленка теперь, в месте наибольшего натяжения, была довольно тонкой и прозрачной, и студенты с большим удовольствием ожидали ее разрыва. Для сбора воды внизу была установлена большая бадья, но поток воды всегда заливал все пространство за столом, что встречалось бурными аплодисментами.

Перед тем, как капля лопнула, и пока она формировалась, Томсон рассуждал о поверхностном натяжении, подчеркивая существенную разницу между натяжением резиновой пленки и поверхностной пленки капли росы и указывая на то, как изменились геометрические фигуры по форме. Затем он тыкал в нее указкой, которую держал в руке, и, повернувшись к классу, когда масса вздрагивала, замечал: "Дрожание капли росы, джентльмены!"

Колебания упругих твердых тел были проиллюстрированы различными способами, часто с помощью желе из телячьих ножек симметричной формы, в верхнюю часть которого в виде молекулы был встроен цветной шарик, за движениями которого можно было проследить. А затем он рассуждал о теории изотропных тел Пуассона-Навье и невозможности фиксированного соотношения, которое эта теория устанавливает между модулем жесткости и модулем сжатия; и с одобрением ссылаясь на серию примеров "совершенно однородных,

гомогенных изотропных твердых тел", которые, как показал Стоукс, можно получить, приготовив желе различной степени жесткости. Другим примером, часто приводимым как указывающий на ложность теории, было совершенно иное поведение блоков индийского каучука и пробки при сжатии на прессе Bramah. Пробка уменьшалась в толщине, не растекаясь по бокам; резина, будучи очень слабо сжимаемой, выпирала по всей окружности по мере уменьшения ее толщины.

Лекции по акустике, которые читались в конце курса, также пользовались огромной популярностью. Были выставлены две валторны со всеми их рычагами и аксессуарами, и иногда, к великому удовольствию класса, Томсон в эссе показывал, как можно изменить высоту ноты с помощью клавиш или руки, вставленной в колокольчик. Определение сиреной высоты нот камертонов, возбуждаемых смычком виолончели, и настройка мажорной терции путем одновременного звучания совершенной пятой нижней ноты часто демонстрировались и комментировались острыми замечаниями, о которых, к сожалению, никогда не публиковалось.²⁵

Заключительная лекция обычного курса обычно была посвящена свету, и тема, которая обычно затрагивалась последней — поскольку весной дни удлинялись, иногда удавалось получить солнечный свет для экспериментов, — часто откладывалась на последний день или два сеанса. Поэтому после часовой лекции Томсон обычно говорил: "Поскольку это последний день сессии, я продолжу еще немного, после того как те, кто должен уйти, разойдутся по своим классам". Затем он возобновлял работу после десяти часов и переходил к одиннадцати, когда студентам предоставлялась еще одна возможность уйти, и лекция снова возобновлялась. Из его дома, где его разыскивали по разного рода делам, посылали гонцов, чтобы узнать, что с ним стало, и час за часом приходил ответ: "Он все еще читает лекции". Наконец, около часу дня он заканчивал и мягко благодарил маленькую и преданную группу, которая оставалась до конца, за их доброе и продолжительное внимание.

В ходе своих лекций Томсон постоянно обращался к своим ассистентам за всевозможными данными. В самое напряженное время своей жизни — пятнадцать лет с 1870 по 1885 год — он доверял своим ассистентам подготовку иллюстраций для занятий, и иногда было немного трудно предугадать его пожелания, поскольку без тщательной репетиции почти невозможно убедиться, что на экспериментальной лекции все пройдет без сучка и задоринки. Отступления, как правило, самые интересные и поучительные, которым он часто предавался, почти всегда приводили к необходимости поставить перед классом какой-нибудь эксперимент, которого никто не ожидал, и всевозможные вещи держались наготове, на случай, если они вдруг понадобятся.

Часто утверждалось, что Томсон обращался к своему помощнику за информацией, содержащейся в таблице умножения, и не мог выполнять обычные арифметические операции. Его активный ум, работающий на опережение утверждений, которые он делал в данный момент, часто не мог вернуться к рассмотрению значения 9, умноженного на 6, и тому подобного; но совершенно неверно, что он был неспособен производить вычисления. У него была хорошая память, и хотя он никогда не мог быть, например, уверен, была ли водянистая влага до или после кристалла в глазу, он, как правило, мог сразу определить, когда была сделана ошибка в отношении любого числового вопроса, касающегося обсуждаемого предмета.

В классе высшей математики, которому он читал лекции по средам, в полдень, Томсон был чрезвычайно интересен. Там он, казалось, работал над предметом во время лекции; постоянно возникали новые вопросы, требующие изучения, и студентам предлагалось проработать их в недельные перерывы между его лекциями. Всегда была нацелена на физическую интерпретацию результатов, обсуждались даже промежуточные этапы. Таким образом, значение математических процессов всегда держалось в поле зрения, и людей, которые могли следовать за ними, заставляли думать во время работы и рассматривать математический анализ всего лишь как вспомогательное средство, а не как самоцель. "Небольшой расход мела экономит мозги"; "искусство чтения математических книг заключается в разумном пропуске", - такие замечания он иногда делал и иллюстрируют его взгляд на относительную важность математической работы, когда он рассматривал ее как служанку мыслителя-физика. Тем не менее, он ценил математику саму по себе и остро ощущал элегантность формы и метода, как заметят читатели таких великих математических дискуссий, как "Приложение о сферических гармониках" Томсона и Тейта. Он с неподдельным восхищением отзывался о работах Грина и Стокса, о великих мемуарах Коши о волнах и о работах Гамильтона по динамике. Но ни одна форма векторного анализа, ни кватернионы Гамильтона, ни векторы Уилларда Гиббса и Хевисайда, не привлекали его, и пример его друга и коллеги Тейта не повлиял на изменение его неблагоприятного вердикта в отношении этого факультета математики, вердикта, который в последующие годы стал только более решительным.

Однажды он начал первую лекцию старшего класса с того, что написал dx/dt в середине доски и потребовал от каждого из десяти или дюжины присутствующих студентов, некоторые из которых были выдающимися выпускниками, что это значит! Один студент описал это как предельное значение отношения приращения зависимой переменной x к приращению независимой переменной t , когда последнее приращение делается бесконечно малым. Он возразил: "Именно это сказал бы Тодхантер!" Остальные дали несколько отличающиеся версии одного и того же определения. Наконец он нетерпеливо заметил: "Неужели никто не знает, что dx/dt означает скорость?" Здесь физическая идея в целом была перед его мысленным взором; и он не подумал о том, что если t обозначает время и x расстояние в любом направлении, то объяснение, данное студентом, действительно описывает скорость с достаточной точностью.

Неприятной особенностью его математических рассуждений была его склонность, когда возникали трудности с символикой, полностью менять обозначения. Также он не был неизменно точен в аналитической работе; но он с лихвой компенсировал это своей способностью разрабатывать тест на точность результата и предугадывать ошибку, которая вкрадлась, если тест не был удовлетворен.

Предметами, которые он изучал, всегда были такие великие разделы математики, как теория приливов - в одном курсе он обсуждал приливные явления в Ла-Манше - общую теорию колебаний, анализ Фурье, теорию волн в воде и т.д., и т.п. Очень хорошее представление о манере и содержании его математических изысков можно получить, прочитав *Балтиморские лекции*.

В физической лаборатории он одновременно вдохновлял и отвлекал. Он постоянно думал о новых вещах, которые нужно было опробовать, и прерывал ход работы вставленными экспериментами, которые часто лишали предшествующую последовательность операций их

конечного результата. Его идеи в целом лучше разрабатывались действительно хорошим корпусом студентов, когда он был вдали от дома и мог только в письме сообщать о своих взглядах на работу, изложенных в ежедневных отчетах, которые ему пересылались.

Он подчеркнуто настаивал на том, что студент, обнаруживший, что квадрантный электрометр плохо работает, должен разобрать его на части, чтобы выяснить, в чем дело. Это, конечно, обычно приводило к возвращению инструмента в мастерскую Уайта для повторной сборки и настройки. Но, как он сказал, у каждой неприятности такого рода была причина, и самое главное было сразу выяснить, в чем она заключалась.

Сосредоточенность Томсона на выполняемой работе и его способность просто завладевать людьми, даже простыми зрителями, и превращать их в помощников часто демонстрировались в лаборатории. Несколько человек, ставших с тех пор выдающимися, были среди ассистентов, зачисленных из числа студентов лаборатории. Профессор У. Э. Айртон, а позже профессор Джон Перри некоторое время были студентами в Глазго и оказали самую способную и желанную помощь в продолжавшихся тогда исследованиях. Эта сила, без сомнения, была секретом его успеха в объединении вокруг себя корпуса энтузиастов-лаборантов в первые годы его профессорства, и это было продемонстрировано также легкостью, с которой он присоединил к себе экзаменационный зал Blackstone, а позже и различные помещения в новых университетских зданиях. Там, спустя некоторое время, сенат обнаружил кабинеты естественной философии, которые включали в себя не только первоначальную классную комнату, лабораторию и т.д., но и все свободные чердаки и коридоры по соседству, и даже самую университетскую башню! Один из его коллег, который высоко ценил его, недавно заметил: "У него была отличная способность к аннексии!"

Упомянутый инцидент произошел, когда он готовил статью о *жаре* для девятого издания *Британской энциклопедии*. Сначала казалось жалким, что Томсон взялся за написание таких статей; но в ходе их подготовки он наткнулся на так много вопросов, по которым не хватало экспериментальной информации, и провел так много исследований, чтобы ответить на свои вопросы, что эссе во многом приобрели характер оригинальных статей. В статье *отеплоте* (он также написал о *упругости*) можно найти длинный отчет о "паровой термометрии", то есть о термометрах, в которых индикаторным веществом должны были быть насыщенные пары различных веществ, воды, сернистой кислоты и т.д. и т.п., поскольку он не ограничивал термин "пар" водяным паром. Некоторое время все в лаборатории были заняты приготовлением сернистой кислоты путем нагревания меди в серной кислоте обычным способом и конденсации газа в пробирках, погруженных в замораживающие смеси; и атмосфера в помещении была такого рода, что, какой бы вредной для различных видов микробов она ни была, было немного труднодышать. Однажды утром, когда все были таким образом заняты, известный химик, только что приехавший домой с юга на каникулы, зашел засвидетельствовать свое почтение. После пары слов вопроса о том, как его молодой друг преуспевает на новом посту, Томсон сказал: "Мы все очень заняты приготовлением жидкой сернистой кислоты для использования в сернокислотных паровых термометрах; нам нужно большое количество жидкости; не могли бы вы помочь нам?" Итак, попросив помощника найти колбу и материалы, он тут же записал этого нового и отличного рекрута; и то, что должно было быть простым вызовом, превратилось в долгий день кропотливой работы над элементарным химическим упражнением!

ГЛАВА XVII

ПРАКТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ—ПОЧЕСТИ И ОТЛИЧИЯ—ПОСЛЕДНЯЯ БОЛЕЗНЬ И СМЕРТЬ

Остается сказать кое-что об общественной и практической деятельности лорда Кельвина. В конечном итоге он получил признание во всем мире как величайший из ныне живущих научных авторитетов почти во всех областях физики. Каждое существующее ученое общество стремилось сделать его своим членом, почетные степени сыпались на него со всех сторон. Список некоторых наиболее важных из этих отличий приведен в Ежегоднике Королевского общества за 1907 год; сомнительно, что можно составить полный список. Он был награжден медалью Кита и Юбилейной медалью Виктории Королевским обществом Эдинбурга, а также последовательно получил медали Копли и Королевские медали Лондонского королевского общества, членом которого он был избран в 1851 году и был президентом с 1890 по 1895 год. В течение нескольких лет он был президентом Эдинбургского королевского общества, которому он передал свои статьи о теплоте, рассеянии энергии, вихревом движении и многие другие воспоминания.

Он был президентом Британской ассоциации на собрании в Эдинбурге в 1871 году, когда произнес президентскую речь, примечательную во многих отношениях, но в первую очередь замечательную в общественном сознании из-за его предположения, что жизнь была передана земле семенем, зародышем, заключенным в расщелине метеорита. В то время многие люди понимали это как попытку объяснить происхождение самой жизни, вместо того, чем она должна была быть, объяснение начала существования живых существ на планете, которая изначально, по завершении своего формирования в результате конденсации вещества туманности, была раскалена докрасна даже на своей поверхности. Несколько раз он был президентом Секции А, постоянно присутствовал на собраниях Ассоциации и был активным слушателем и участником дискуссий. Его научное любопытство никогда не оставляло его в покое, и он очень любил встречаться и беседовать с научными работниками.

Леди Томсон, долгое время остававшаяся инвалидом, умерла в 1870 году, а в 1874 году сэр Уильям Томсон женился на мисс Фрэнсис Анне Блэнди (дочери мистера Чарльза Р. Блэнди с Мадейры), которая пережила его как леди Келвин. Ее нежной заботе он во многом был обязан своей постоянной и продолжительной деятельностью во всех видах работы. Она сопровождала его на всех публичных мероприятиях, и он во многом полагался на ее услужливость и неусыпную заботу.

В 1892 году сэр Уильям Томсон, будучи президентом Королевского общества, был возведен в звание пэра с титулом барона Кельвина из Нетерхолла, Ларгс; а совсем недавно он был награжден орденом "За заслуги" и орденом почетного звания. Он был кавалером прусского ордена *За Мерит*, иностранным сотрудником Института Франции и великим офицером ордена Почетного легиона. Но никакие общественные почести или знаки королевской милости не могли поднять его в глазах всех, кто что-либо знает о науке или о трудах ученых, которым мы обязаны всем необходимым и роскошью нашей нынешней цивилизации.

В 1896 году город и университет Глазго отметили юбилей его профессорства натурфилософии. Ликования по этому случаю никогда не будут забыты теми, кому выпала честь принять в них участие. Делегаты съехались из всех стран мира, и короли и принцы, университеты и ученые общества, колледжи и схоластические заведения всех мастей соперничали друг с другом в почтении ветерана, который столько лет сражался за истину и свет и одержал столько побед. Был опубликован памятный том трудов, включающий обзор работ лорда Кельвина покойным профессором Фитцджеральдом, а полный отчет того времени появился в *Nature* и других журналах, так что нет необходимости приводить здесь подробности. И действительно, никаким словесным описанием невозможно передать представление об энтузиазме, с которым научный мир приветствовал своего лидера, а также о достоинстве и торжественности церемоний.

В 1899 году, в возрасте семидесяти пяти лет, лорд Кельвин оставил кафедру естественной философии и удалился на покой, но не для того, чтобы отдохнуть, а для того, чтобы более энергично, чем когда-либо, исследовать свойства материи. Одним из замечательных плодов его досуга является его великая книга *"Балтиморские лекции"*, в которой теории света обсуждаются с такой силой, которая вызывает благоговение у всех, кто занимается новыми исследованиями, и которую вызвали к жизни недавние открытия. И не будет преувеличением сказать, что средства обсуждения и распространения этих открытий в значительной степени принадлежат лорду Кельвину.

В течение 1907 года лорд Кельвин выполнял множество университетских обязанностей и, казалось, был необычайно здоров. Он председательствовал в качестве канцлера при назначении мистера Асквита лордом-ректором 11 января и в том же качестве присутствовал несколькими днями позже на похоронах директора Стори, вице-канцлера, который скончался 13 января. 23 апреля он председательствовал на долгих и трудных церемониях почетного выпуска и публичного открытия принцем Уэльским нового Института естественной философии и новых медицинских корпусов. В качестве канцлера он присвоил принцу и принцессе степень доктора юридических наук и занял председательское место на ленче, следовавшем за церемонией, когда в короткой и изящной речи он произнес за здоровье принцессы.

Он также мог принимать участие в различных политических и общественных собраниях и уделять внимание работе, ведущейся на заводах его фирмы на Кембридж-стрит. Леди Келвин и он покинули Нетерхолл, Ларгс, и отправились в Экс-ле-Бен в конце июля, но мимоходом посетили Британскую ассоциацию в Лестере. Там он услышал президентскую речь своего старого друга сэра Дэвида Гилла, которому в своей обычной жизнерадостной манере выразил благодарность.

В течение многих лет лорд Кельвин привык проводить месяц или шесть недель летом или ранней осенью на знаменитом французском водоеме, от которого он, казалось, всегда получал много пользы. Долгое время он страдал от перемежающейся и болезненной формы лицевой невралгии, которая, за исключением приступов, которые внезапно возникали и проходили, не лишала его трудоспособности. За исключением довольно серьезной болезни в 1906 году, это был единственный недуг, от которого он страдал в течение многих лет, и в остальном его общее состояние здоровья было неизменно хорошим.

Лорд и леди Келвин вернулись в Нетерхолл 14 сентября с намерением через день или два отправиться в Белфаст, на открытие новых научных корпусов Королевского колледжа. Но, к сожалению, в день их прибытия леди Келвин очень серьезно заболела, и от визита в Ирландию

пришлось отказаться. Однако его обращение было зачитано его племянником Джеймсом Томсоном, сыном его старшего брата, и было данью уважения городу, в котором он родился, и памяти его отца.

Болезнь леди Келвин вызывала много беспокойства в течение многих недель, и это, а также, возможно, какое-то неосторожное разоблачение привели к ухудшению здоровья лорда Келвина. Простуда, подхваченная 23 ноября, привела к тому, что он был прикован к постели; и хотя неделю или две ему удавалось еще выполнять какую-то работу над газетой, которой он был занят в течение значительного времени, ему становилось хуже, и он постепенно сдавался, пока не скончался в четверть одиннадцатого вечера 18 декабря.

Острая скорбь, которую все испытывали в связи со смертью лорда Кельвина, была проявлена всеми слоями общества. В Глазго каждый скорбел как о величайшем человеке страны, и свидетельство привязанности, с которой к нему относились, и почтения к его характеру и научным достижениям было экстраординарным. И это чувство было всеобщим; со всех концов света посыпались телеграммы с выражением почтительного сочувствия леди Келвин и Университету Глазго в связи с их тяжелой утратой.

Немедленно и решительно было высказано мнение, как в частном порядке, так и в прессе, что самый прославленный натурфилософ со времен Ньютона должен покоиться рядом с великим основателем физической науки в Вестминстерском аббатстве, и Лондонское королевское общество немедленно подготовило запрос и направило его декану Вестминстера. Желание всего научного мира было немедленно удовлетворено, и 23 декабря, в полдень, состоялось погребение с торжественностью и в то же время простотой, которая никогда не будет забыта теми, кто присутствовал при этом.

Присутствовали почти все известные ученые страны, и гроб, которому предшествовали певчие и духовенство, под исполнение гимна "Здесь наша доля - короткая жизнь", проследовал по закрытым проходам от часовни Святой Веры до хора в сопровождении родственников, представителей Его Величества короля и принца Уэльского, Королевского общества, делегатов Института Франции, представителей университетов Кембриджа, Оксфорда, Глазго и других университетов, Королевского общества Эдинбурга (президентом которого лорд Кельвин был на момент смерти), членов Королевского общества. и о большинстве ученых обществ королевства. Затем, после короткой службы, та же компания скорбящих проводила тело до могилы в монастырях, и под торжественные слова Заупокойной службы его положили рядом с тем местом, где покоится все, что было смертным от Исаака Ньютона. Там спокойно спит тот, кто всю долгую жизнь трудился на благо естественных знаний и благородно служил, как герой мира, своей стране и всему миру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неполный очерк научной жизни и деятельности лорда Кельвина, содержащийся в этой книге, может дать лишь слабое представление о великих достижениях его долгой жизни, которая сейчас закончилась. Помимо исследований, которые он проводил, и сделанных им открытий, есть вдохновение, которое его работа и пример давали другим. Вдохновленный Лагранжем,

Лапласом, Ампером и Фурье, он обратился к экспериментальным исследованиям из-за необходимости найти ответы на вопросы, которые были предложены его математическим выражением открытий, сделанных за двадцать пять лет, предшествовавших созданию его лаборатории, - теорий электричества и магнетизма, теплоты, упругости, его открытий в области общей динамики и движения жидкости, публикации "Томсона и Тейта", - все это сделало его вдохновителем других; и не было никого, каким бы выдающимся он ни был, кто не был бы горд признать свои обязательства перед его гением. Клерк Максвелл, прежде чем написать самый оригинальный трактат об электричестве, который когда-либо появлялся, посвятил себя изучению экспериментальных исследований Фарадея и работ Томсона. И если некоторые, подобно Фицджеральду и другим, сожалели о том, что электромагнитная теория света, к которой Максвелл привел Фарадей и, более того, сам Томсон, не встретила более благожелательного приема в его руках, они не забыли об источнике, из которого исходила большая часть их идей.

Он основал школу мысли в области математической физики, людей, в сознании которых символ всегда является слугой идей, чей девиз — интерпретация с помощью динамических процессов и моделей, насколько это возможно, которые не уклоняются от математических трудностей, когда с ними приходится сталкиваться, но никогда не отклоняются от прямого пути к цели, к достижению которой они стремятся - систематической и четкой формулировке курса физических действий.

И в сознании лорда Кельвина к ясному физическому инстинкту, который отбрасывал все постороннее и несущественное для решения главного вопроса, примешивалась необычайная сила концентрации на рассматриваемой проблеме и решимость, которую никогда не пугали неудачи, которая соглашалась на отсрочку, но никогда не сдавалась и которая часто после длительных промежутков времени приводила в конце концов к успеху. Он верил, что наконец-то прольется свет на самую запутанную из проблем, если только на нее взглянуть со всех точек зрения и полностью сформулировать ее условия; но он мог отложить в сторону то, что на тот момент было невозможным, и посвятить себя тому, что возможно и реализуемо немедленно. И, как это часто бывает с каждым мыслителем, его разум, освобожденный от задачи, вернулся к ней сам по себе, и то, что раньше казалось окутанным непроницаемым туманом, вдруг предстало резко и отчетливо, как горная вершина перед альпинистом, который наконец поднялся выше облаков.

С большими математическими способностями и верным чутьем, которые привели его к успеху в физических исследованиях, сочеталось острое понимание важности практического применения. Иногда практический вопрос предполагал теоретические и экспериментальные исследования, как тогда, когда потребности подводной телеграфии привели к обсуждению скорости передачи сигналов и эволюции отражающего гальванометра и сифонного самописца. С другой стороны, математическая теория электричества и магнетизма привела к количественным измерениям и абсолютным единицам в более ранние времена, когда потребность в них начала отчетливо ощущаться научными работниками и смутно теми дальновидными практиками, которые мечтали — в то время это считалось мечтой — соединить Старый Свет с Новым подводным кабелем. Но количественное исследование электричества в лаборатории пролило свет на экономические условия, и масса уже полученных данных, главным образом в результате простого экспериментального исследования свойств вещества,

сразу же стала ценным достоянием внезапно возникшей расы инженеров по подводным кабелям.

То же самое произошло и с более поздними видами применения электричества. Индукция токов, открытая Фарадеем, не могла приобрести практического значения до тех пор, пока ее законы не были обсуждены количественно, а это гораздо более длительный процесс, чем процесс открытия; и мы видели, как Комитет Британской ассоциации, возглавляемый Томсоном и Максвеллом, привел идеи и величины этой новой отрасли науки в числовое соотношение с единицами измерения уже существующего практического предприятия.

Электроизмерительные приборы — сначала электрометры, а совсем недавно весы электрического тока и другие прекрасные приборы для динамо-машины и мастерской, — которые изобрел лорд Кельвин, привнесли лабораторную точность в повседневные обязанности обслуживающего персонала запасных батарей и проводника.

А что касается методов измерения, то те, кто помнит туманность, с которой даже инженеры-телеграфисты относились к измерению эффективности электрических токов и электродвижущих сил в цепях ламп и динамо-машин на заре электрического освещения, знают, сколь многим мир обязан Томсону.²⁶ Именно он сначала показал, как должны тестироваться кабели, а также как с ними работать; его задачей, опять же, было показать, как должны калиброваться приборы для практического измерения тока и энергии, поставляемых потребителям первыми подрядчиками. Задолго до этого он в тиши своей лаборатории разработал методы сравнения сопротивлений и использовал вторичные провода весов Уитстона для сравнения низких сопротивлений; теперь он показал, как те же принципы могут быть применены для измерения эффективности динамо-машин и для учета заряда и разрядки вторичной батареи.

И если самописец, компас моряков и зондирующая машина приносили финансовую прибыль, наградой становился изобретатель, имеющий неоспоримое право на плод своего ума и своих рук. Но деятельность лорда Кельвина не ограничивалась только теми практическими вещами, которые, выражаясь обычным языком, "приносят прибыль"; он свободно отдавал свое время и энергию совершенствованию гармонического анализа приливов, снова предпринял, по поручению Комитета Британской ассоциации, исследование приливов и отливов в различных частях света, руководил анализом записей о приливах и изобретал машины для прогнозирования приливов и усовершенствованные приливомеры.

Работа лорда Кельвина в области теории теплоты и науки об энергии в целом дала бы ему право на бессмертие, даже если бы она была самостоятельной; и даже у самого решительного практического сторонника цикла Карно не может быть сомнений в огромной важности этих достижений. Здесь он был первопроходцем, и все же его статьи, теоретические и в то же время практические, написанные одна за другой карандашом и отправленные, какими бы грубыми они ни были, для печати Королевскому обществу Эдинбурга, образуют, поскольку они собраны в первом томе его *математических и физических работ*, в некоторых отношениях лучший трактат по термодинамике на сегодняшний день! Существуют трактаты, написанные с более общей точки зрения, в которых рассматриваются сложные проблемы химического и физического изменения термодинамических потенциалов и процессов, которые не изложены в этом томе статей; но даже они в значительной степени являются результатом его "Термоупругих, термомагнитных и термоэлектрических свойств вещества".

В гидродинамике также лорд Кельвин никогда не упускал из виду практическое применение, даже проводя наиболее интенсивные теоретические исследования действия вихрей или распространения волн. В последние годы жизни он разработал теорию корабельных волн с силой, которая заставила не одного умелого и успешного специалиста в этой области науки сказать, что он был не простым математиком, а человеком, который, подобно пророкам древности, мог разгадать то, что скрыто от глаз обычных смертных. В исключительной важности этого для практических вопросов строительства кораблей и экономии топлива в их двигателях не может быть никаких сомнений. К сожалению, теперь заявки должны будут подавать другие пользователи.

Интересно отметить, что исследование волн в каналах, которым Лорд Кельвин недавно обогатил *Труды Королевского общества Эдинбурга*, было проведено с помощью поразительно остроумной адаптации решения Фурье дифференциального уравнения распространения тепла вдоль стержня или электричества вдоль медленно протянутого кабеля. Таким образом, начав с математики Фурье в своих самых ранних исследованиях, он в некоторых своих последних работах применил специальную экспоненциальную форму решения Фурье уравнения диффузии к случаю распространения волн, существенно отличному по физической природе и математическому значению от того, для которого оно было первоначально дано.

Письменные работы лорда Кельвина состоят из *"Электростатики и магнетизма"*, трех томов *Собрания математических и физических работ*, трех популярных лекций и обращений, *Балтиморских лекций*, очень значительного количества еще не собранных работ и *Натурфилософии*. Но это, каким бы великим оно ни было, составляло лишь относительно небольшую часть его деятельности. Он консультировал государственные компании по специальным инженерным и электрическим вопросам, работал в королевских комиссиях, выступал в качестве инженера-консультанта кабельных компаний и других корпораций, был арбитром в спорах, когда затрагивались научные вопросы, выступал за отличительную сигнализацию для маяков и изобрел оборудование для этой цели, и он был, прежде всего, великим изобретателем. Его патенты многочисленны и важны. Один из них касался водопроводного крана, из которого гарантированно не будет капать вода, другой, на электрогенерирующие машины, счетчики и т.д., был, пожалуй, самым крупным из когда-либо выданных патентов.

Ссылка на классное руководство лорда Кельвина была сделана в предыдущей главе. Он, безусловно, вдохновлял лучших учеников. На собраниях Британской ассоциации его яркие замечания в ходе дискуссий помогали и воодушевляли молодых работников, а его энтузиазм был заразителен. Но с обычным студентом, который не может получить или сохранить свою ментальную пищу иначе, как с помощью тщательно изученного способа изложения, он не добился такого успеха. Он слишком много видел, пока говорил; новые идеи или новые способы восприятия старых возникали неожиданно, ассоциации теснились в его уме, и он был склонен к дискурсу, к недоумению всех, кроме тех, чей разум также был наделен чем-то вроде физического инстинкта или восприятия. Тогда он был так занят многими вещами, что не нашел времени обдумать и упорядочить содержание своих элементарных лекций с точки зрения изложения, наиболее соответствующего возможностям его слушателей. На недавно высказанное предположение, что его не следовало обязывать читать лекции учащимся начальной школы, он был бы первым, кто возразил. На самом деле, в последние годы своей жизни он читал лекции обычному классу только два раза в неделю, а высшему классу - один

раз. Остальные лекции читал его племянник, доктор Дж. Т. Боттомли, который в течение почти тридцати лет был его заместителем по большей части рутинной работы кафедры.

Вряд ли стоит опровергать часто высказываемое утверждение, что лорд Кельвин не мог выполнять простые арифметические операции. Правда в том, что в классной комнате он был слишком увлечен ожиданием результатов вычислений или слишком занят мыслями о том, что лежало за их пределами, чтобы беспокоиться о таблице умножения, и поэтому он часто обращался к своим помощникам за элементарной информацией, которую в данный момент его быстро работающий ум не мог получить сам.

Подводя итог, можно сказать, что научная деятельность лорда Кельвина продолжалась почти семьдесят лет. Он родился через четыре года после того, как Эрстед сделал свое знаменитое открытие о действии электрического тока на магнит, и за два года до того, как Ампер, основываясь на этом эксперименте, опубликовал первые большие мемуары об электромагнетизме. Таким образом, в его жизни наблюдался рост современной науки об электротехнике от ее настоящего зарождения до ее нынешней энергичной юности. Открытия Фарадея в области электрической индукции были известны миру, когда лорд Кельвин был мальчиком, и одна из величайших задач, которую он выполнил, заключалась в том, чтобы сплести эти открытия воедино в единую сеть математической теории. Эта теория предлагала, как мы видели, новые проблемы, подлежащие экспериментальному решению, которые он решал с помощью своих студентов в маленькой и скудно оборудованной лаборатории, созданной шестьдесят лет назад в Старом колледже на Хай-стрит. Ему выпало на долю дожить до того, чтобы увидеть, как его теоретические выкладки приводят к новым разработкам в его собственных руках и руках других гениальных людей — например, Гельмгольца и Клерка Максвелла, — и дожить до тех пор, пока эти разработки не приведут к практическому применению во всех отраслях нашей промышленности и во всех сферах современной жизни и работы. Его истинным памятником будет его работа и ее результаты, и лишь нескольким людям в мировой истории был воздвигнут такой массивный и величественный мемориал.

Он был неутомимым работником. Каждый день своей жизни он был занят множеством дел, но никогда не был перегружен. Проблемы природы всегда были у него на уме, но он мог отложить их в сторону в суе дел и немедленно взяться за них снова, чтобы продвинуть их еще на один этап к решению. Его "зеленая книжка" была под рукой, на столе или в кармане; и всякий раз, когда выдавалась свободная минута, он брал в руки карандаш и углублялся в тройные интегралы и приложения теоремы Грина, этого неисчерпаемого ресурса математиков-физиков.

Saepe stilum veritas quae digna legi sint Scripturus,

девиз, который рекомендует Гораций, принадлежал ему, и он в шутку цитировал его, указывая на ластик в верхней части своего золотого пенала. Он стирал, исправлял, дополнял и переписывал с неослабевающим усердием, к ужасу своего секретаря-стенографа.

Теории и факты электричества и магнетизма, возникновения и распространения волн в воде или в световом эфире, структура и плотность самого эфира, соотношение тепла и работы, движения небесных тел, строение кристаллов, теория музыки, практические проблемы навигации, подводного телеграфирования и электрического освещения городов — все это и многое другое возникало у него в голове по очереди, а иногда и большинство из них в течение

одного дня. Он мог переключаться с одного занятия на другое и находить душевный покой в разнообразии умственных занятий.

Он читал лекции своим обычным слушателям с девяти до десяти часов утра, хотя обычно это была далеко не первая научная работа за день. В десять часов он проходил через свою лабораторию и разговаривал со своими студентами или с любым человеком, который, возможно, ждал его, чтобы проконсультироваться, отвечал на какое-нибудь срочное письмо или давал указания своему секретарю; затем он шел пешком или ехал на машине в мастерскую Уайта, чтобы погрузиться в детали конструкции приборов, пока ему снова не пора было завтракать в университете, или читать лекцию своему высшему математическому классу по какому-нибудь такому предмету, как теория приливов или анализ Фурье.

В качестве научного консультанта подводных телеграфных компаний и других государственных органов, а совсем недавно в качестве президента Лондонского королевского общества он часто совершал поездки в Лондон. Они были организованы таким образом, чтобы потребовать минимальных затрат времени. Он путешествовал ночью, когда был один, и мог делать это с комфортом, поскольку обладал даром хорошо спать практически при любых обстоятельствах. Таким образом, однажды вечером он отправлялся в Лондон, проводил напряженный день во всевозможных делах — научных, практических или политических — и возвращался следующей ночью в Глазго, свежий и готовый к работе по прибытии. Здесь можно отметить его способность отстраняться от своего окружения, откладывать в сторону вещи, которые вполне могли быть тревогами, и снова погружаться в проблему, от которой обстоятельства заставили его временно отказаться.

Говорят, что гениальность — это способность прилагать бесконечные усилия: это действительно так, но это и гораздо большее. Гениальность означает идеи, интуицию, способность улавливать мыслью скрытые взаимосвязи вещей и, вместе с тем, способность шаг за шагом продвигаться к их ясному и полному выражению, будь то на языке математического анализа или в дикции повседневной жизни. Таков был гений лорда Кельвина; он был возвышенным и практичным. Он понимал — ибо почувствовал — очарование знания помимо его применения к механическим устройствам; он не побрезговал посвятить свои великие силы служению человечеству. Объектами его ежедневного созерцания были игра сил, действия тел во всех их разнообразных проявлениях, или, как он предпочитал обобщать область физики, наблюдение и обсуждение свойств материи. Но его глаза всегда были открыты для понимания значения всего, что он видел или открыл для совершенствования промышленных приборов, для возможности использования этого для повышения комфорта и безопасности людей и, таким образом, для увеличения общей суммы человеческого счастья.

Его заявление, которое так часто цитировали, о том, что после пятидесяти пяти лет постоянных занятий он знал об электричестве и магнетизме немногим больше, чем в начале своей карьеры, не следует воспринимать как признание в неудаче. Это было, как и знаменитое заявление Ньютона, свидетельством его ощущения необъятности океана истины и многообразия сокровищ, которые все еще лежат в его "глубоких непостижимых пещерах". Подобно Ньютону, он просто бродил по берегу этого великого океана и то тут, то там прощупывал его доступные глубины, в то время как его бесконечные просторы оставались неизведанными. И также, как Ньютон — действительно, как все великие люди, — он с глубоким почтением относился к великим проблемам души и предназначения человека. Он верил, что Природа, которую он

стремился познать и понять всю свою жизнь, повсюду являла дело рук бесконечного и благотворного разума, и он верил, что в конце концов все, что казалось темным и сбивающим с толку, предстанет в полноте света.

СНОСКИ

1 Обращение лорда Кельвина по случаю его вступления в должность ректора Университета Глазго, 29 ноября 1904г.

2 Преемник доктора Дика, профессора естественной философии, который убедил факультет предоставить мастерскую Джеймсу Уатту, когда Корпорация Хаммерменов помешала ему начать бизнес в Глазго, и для которого Уатт ремонтировал двигатель Ньюкомена, когда изобрел отдельный конденсатор.

3 Модель паровой машины, которую он сделал в юности, была бережно сохранена его братом на кафедре естественной философии. Он был невзрачным, но точным по конструкции: балка была деревянной, а поршень - старым толстым медным пенни!

4 Материалы по случаю вручения Университету Глазго портрета заслуженного профессора Г. Г. Рамзи. 6 ноября 1907 года.

5 По-видимому, на короткое время в 1841 году, когда доктор Мейклхэм ушел в отставку из-за болезни.

6 C.U.M.S. возникло как общество Питерхауса в 1843 году, и после первого концерта, за которым последовал ужин, а также "определенные операции на крыше часовни", Мастер разрешил провести второй концерт в Red Lion в Кембридже, поскольку в колледже не было места, при условии, что общество будет называть себя Университетским музыкальным обществом. Новое общество было образовано в мае 1844 года; первым президентом был Г. Э. Смит из Питерхауса, вторым был Блоу, также из Питерхауса, скрипач и виолончелист, а третьим был Томсон. [См. "Кембридж Кроникл", 10 июля 1903 г., и "Кембридж Ревью", 20 февраля 1908 г.]

7 Довольно странно, что девятое издание *Британской энциклопедии* не содержит биографии Грина. Родившийся в 1793 году в Ноттингеме, в семье пекаря, он помогал своему отцу, который позже приобрел мельничное дело в соседней деревне Снейнтон. В 1829 году умер его отец, и он отказался от бизнеса, чтобы иметь свободное время для занятий математикой, в которой, хотя он был полностью самоучкой, он начал проводить оригинальные исследования. Его знаменитое "Эссе" было опубликовано по подписке в 1828 году и привлекло мало внимания. В 1833 году, в возрасте сорока лет, Грин поступил в колледж Гонвилл и Кайус и занял четвертое место в математической олимпиаде 1837 года, года Гриффина, Сильвестра и Грегори. Его университетская карьера, что бы еще она ни делала, очевидно, не способствовала тому, чтобы его ранние работы стали намного более известными широкой научной общественности, и он умер в 1841 году, так и не получив причитающегося ему научного признания. Это произошло позже, когда, как указано ниже, Томсон открыл его французским математикам и переиздал свое "Эссе".

8 января 1869 г., *Перепечатка* и т.д., статья XV.

9 Перепечатка, Статья V.

10 Однако геометрическая идея была дана и применена Беллавитисом по крайней мере еще в 1836 году, поскольку статья под названием "Теория инверсии фигур" появляется в *Анналах науки Царства Ломбардо-Венето* за тот год. Это также было описано как независимое открытие мистером Джоном У.М. Стаббсом в статье в *Philosophical Magazine* за ноябрь 1843 года. В заметке об истории преобразования в *геометрии коник Тейлора* приведена дата (без ссылки) Беллавитиса и указано, что метод инверсии был предложен заново господами. Ингрэм и Стаббс (Дублин, Фил. соч. Пер. I). В заметке также упоминается, что инверсия была "применена доктором Херстом к аттракционам", но не содержит ссылок на статьи Томсона!

11 "О распределении калорий по всему корпусу" в протоколе факультета, как указано выше.

12 Так. Без сомнения, это ошибка переписчика при написании "Лиувилля".

13 Хроника Северного Уэльса, Отчет, 7 февраля 1885г.

14 Опубликовано: *Трактат по естественной философии*, том. i в 1867 году; *Элементы натуральной философии* в 1873 году.

15 Точную дату, когда это было сделано, невозможно определить из Протокола заседания факультета, поскольку в нем нет упоминания о выделении помещения для этой цели. В своей речи о *Джеймсе Ватте*, произнесенной на Девятом юбилее Университета Глазго в 1901 году, лорд Кельвин упомянул Физическую лабораторию Глазго как выросшую между 1846 и 1856 годами; и в другом месте он упоминал о ней как о "зарождающейся" в 1851 году.

16 Сейчас в Глазго только на зимней сессии около 360 учащихся начальных классов и 80 продвинутых студентов, и около 250 проходят практические лабораторные работы.

17 Перед своей смертью (в 1832 году) Карно получил четкое представление об истинном положении дел и о целостной доктрине консерватизма энергии. [См. Выдержки из неопубликованных трудов Карно, приложенные вместе с биографией к переизданным мемуарам его младшего брата Ипполита Карно.]

18 Это уравнение для эксперимента с пористой пробкой может быть установлено следующим образом, что является хорошим примером второго определения абсолютной температуры Томсоном. Примите давление и объем газа на стороне подачи пробки за $p+dp$ и v , а на стороне подачи - за p и $v+dv$, чтобы dp и dv были положительными. Чистая работа, проделанная при продувке газа через пробку $= (p+dp)v - p(v+dv) = -pdv + vdp$. Пусть в результате возникнет эффект нагрева, при котором температура изменится с T на $T+\partial T$. Пусть это будет устранено отводом тепла $C_p \partial T$ при постоянном давлении. (C_p = сп. тепловой пресс. константа.) [Следует понимать, что dv - это полное расширение, существующее после этого отвода тепла.] Энергия e жидкости была увеличена на $de = -pdv + vdp - C_p \partial T$.

Теперь, поскольку первоначальная температура восстановлена, такое же расширение dv , если его проводить изотермически, повлекло бы за собой такое же изменение энергии de ; но в этом случае тепло dH (динамическое) было бы поглощено, и работа pdv выполнялась бы газом. Следовательно, $de = dH - pdv$. Это, с учетом прежнего значения de , дает $dH = vdp - C_p \partial T$. Таким образом, коэффициент работы Томсона равен $pdv / (vdp - C_p \partial T)$. Теперь предположим, что dp вводится без изменения объема, а dT будет результирующим изменением температуры.

Соотношения температуры и давления равны $dT/T, dp/p$. Таким образом, $dT/T = dp dv / (vdp - C_p \partial T)$, или

$$\frac{v}{T} \frac{dT}{dv} = \frac{1}{1 - \frac{C_p}{v} \frac{\partial T}{\partial p}}$$

это уравнение Томсона. Знак *минус* справа возникает из-за эффекта нагрева, который был принят здесь за обычный случай.

Если температуру T восстанавливают путем отвода тепла при постоянном объеме, аналогичный процесс дает уравнение

$$\frac{v}{T} \frac{dT}{dv} = \frac{1 + \frac{\partial T}{\partial p} \frac{\partial T}{\partial p}}{1 - \frac{C_v}{v} \frac{\partial T}{\partial p}}$$

где dp - изменение давления *перед* восстановлением температуры T , $\partial T / \partial p$ - скорость изменения T при p , постоянная объема.

19 "Об универсальной тенденции в природе к рассеянию энергии", *Труды R.S.E.*, 1852, и *Phil. Mag.*, октябрь 1852.

20 К этому можно добавить чрезвычайно полезную теорему для таких задач, что если какая-либо направленная величина L , скажем, характерная для движения тела, связана с линией или осью Ol , которая меняется в направлении, это приводит к мгновенному образованию такой же величины для линии или оси под прямым углом к Ol , к которому Ol поворачивается с угловой скоростью ω , величиной ωL . Если M - это количество, уже существующее для этой последней линии или оси, то общая скорость роста количества равна $M + \omega L$. Например, частица, движущаяся с равномерной скоростью v по окружности радиусом r , имеет импульс mv по касательной. Но касательная поворачивается, когда частица движется с угловой скоростью ω по направлению к радиусу. Таким образом, скорость нарастания импульса к центру составляет

$$mv \times v/r = mv^2/r.$$

21 См. *Lehrbuch der Physik* Грея, с. 278. Vieweg u. Sohn, 1904.

22 Грей, Королевский институт, вечерняя беседа в пятницу, февраль 1898 года.

23 Смотрите *Отчеты Комитета по электротехническим стандартам*, отредактированные проф. Флиминг Дженкин, Ф. Р.С., "Электричество и магнетизм" Максвелла и "Теория и практика абсолютных измерений в электричестве и магнетизме" Грея, том. II, Часть II.

24 Автор статьи однажды густой ночью на пассажирском пароходе, участвовавшем в гонке Олдерни, когда двигатели были остановлены и производилась промерка, увидел, как катушка со шнуром упала за борт, едва не унося с собой одного из матросов. Пришлось достать новый моток шнура и намотать его на новую катушку; операция, занявшая много времени, в течение которой точное местонахождение корабля было предметом неопределенности. Комментарии излишни!

25 Настройка мажорной трети таким образом описана в статье, озаглавленной "Ритмы несовершенных гармоний", опубликованной в *популярных лекциях и выступлениях*, том ii.

26 Автор хорошо помнит встречу с человеком, имеющим некоторый опыт работы с кабелем, который направлялся измерять переменные токи в свечной установке Яблочкова с помощью гальванометра Айртона и Перри со стальной иглой!

Richard Clay & Sons, Limited,
БРЕД-СТРИТ-ХИЛЛ, округ КОЛУМБИЯ, И БАНГЕЙ, САФФОЛК.